



TITLE:

# AE法及びレーダ探査による文化財 の生物劣化の非破壊診断と保存処 理の監視技術

AUTHOR(S):

藤井, 義久

---

CITATION:

藤井, 義久. AE法及びレーダ探査による文化財の生物劣化の非破壊診断  
と保存処理の監視技術. 2006

ISSUE DATE:

2006-02

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/85078>

RIGHT:

学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていない  
ため未掲載。

---

AE 法及びレーダ探査による  
文化財の生物劣化の非破壊診断と  
保存処理の監視技術

---

14380049

平成 14 年度～16 年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 18 年 2 月



研究代表者 藤井義久

京都大学大学院農学研究科 助教授

---

AE 法及びレーダ探査による  
文化財の生物劣化の非破壊診断と  
保存処理の監視技術

---

14380049

平成 14 年度～16 年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 18 年 2 月

研究代表者 藤井義久

京都大学大学院農学研究科 助教授

本研究課題では、非破壊検査の手法である AE 法とレーダ探査による木質の文化財建造物における虫害や腐朽といった生物劣化の検出および評価の手法について、基礎から応用にわたる包括的な開発、実証実験や調査を行った。さらにこれらを統合して、劣化診断の技術体系の基礎的部分を明らかにした。本報告は、これらの成果を集約および掲載したものである。

成果については未熟、未完成な部分もあるが、本報告が関係する方々にとって参考になれば望外の幸せである。また本研究を推進するにあたり、文化財の保存修復に関わる多くの方々のご助言とご協力を賜った。これらの方々に深甚な感謝を意を表します。

#### 研究組織

研究代表者 : 藤井義久 (京都大学大学院農学研究科助教授)  
 研究分担者 : 今村祐嗣 (京都大学生存圏研究所教授)  
 研究分担者 : 奥村正悟 (京都大学大学院農学研究科教授)  
 研究分担者 : 築瀬佳之 (京都大学大学院農学研究科助手)  
 研究分担者 : 吉村 剛 (京都大学生存圏研究所助教授)  
 研究分担者 : 澤田 豊 (京都大学大学院農学研究科助手)  
 (研究協力者 : 藤原裕子)

交付決定額 (配分額) (金額単位 : 円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成 14 年度	4,300,000	0	4,300,000
平成 15 年度	3,400,000	0	3,400,000
平成 16 年度	2,700,000	0	2,700,000
総 計	10,400,000	0	10,400,000

#### 研究発表

##### (1) 学会誌等

1. 藤井義久 : AE モニタリングによるシロアリ食害の非破壊探知. 材料, 51(5) 594-595 (2002)
2. 藤井義久 : シロアリ被害の AE による探知. 検査技術, 7(12) 43-48 (2002)
3. Tomoe Nakayama, Yoshiyuki Yanase, Tsuyoshi Yoshimura, Yoshihisa Fujii, Yuji Imamura: Effect of humidity changes on the feeding activity of a pest termite, *Reticulitermes speratus*



- (Kolbe). Japan Society of Environmental Entomology and Zoology, 13(3), 125-131 (2002)
4. 栗山欣悟, 澤田豊, 藤井義久, 奥村正悟: サーモグラフィ装置を用いた木材の横圧縮変形時の温度測定. 森林研究, 74, 149-157 (2002)
  5. 藤野勝徳, 澤田豊, 藤井義久, 奥村正悟: ボールエンドミルによる木材の三次元曲面加工—平面加工による予備実験— 森林研究, 74, 159-166 (2002)
  6. Yoshiyuki Yanase, Yoshihisa Fujii, Shogo Okumura, Tsuyoshi Yoshimura and Yuji Imamura: A Long-term Observation of Termite Activity in The Nest by Continuous Acoustic Emission (AE) Monitoring IRG/WP 03-20280, 2003
  7. Yoshiyuki Yanase, Yoshihisa Fujii, Shogo Okumura, Tsuyoshi Yoshimura, Yuji Imamura, Toru Maekawa and Kengo Suzuki: Detection of Termite Attack to Wood Stakes in A Monitoring Station Using Ceramic Gas Sensors and Acoustic Emission (AE) Sensor. IRG/WP 03-20271, 2003
  8. Yuliati Indrayani, Tomoe Nakayama, Yoshiyuki Yanase, Yoshihisa Fujii, Tsuyoshi Yoshimura, and Yuji Imamura: Feeding activities of the dry-wood termite *Cryptotermes domesticus* (Haviland) under various relative humidity and temperature conditions using acoustic emission monitoring. Japan Society of Environmental Entomology and Zoology, 14(4), 205-212 (2003)
  9. Y. Fujiwara, Y. Fujii, and S. Okumura: Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood. Forest Products Journal, 53(2), 58-62 (2003)
  10. 牧野留美、上野友紀子、藤井義久、奥村正悟：有限要素法を用いた木質床壁小型模型の振動モード解析および衝撃応答解析. 森林研究 75, 35-43(2003)
  11. Yuko Fujiwara, Yoshihisa Fujii, Yutaka Sawada and Shogo Okumura: Assessment of wood surface roughness: comparison of tactile roughness and three-dimensional parameters derived using a robust Gaussian regression filter. Journal of Wood Science 50, 35-40, (2004)

#### (1) 口頭発表

1. Y. Fujii, T. Kuroda, Y. Kohdzuma, Y. Yanase, S. Okumura, and Y. Imamura: Detection of acoustic emission (AE) from water logged wood in PEG treatment. International Congress on the Conservation and Restoration for Archaeological Objects, Nara, 14-16 Feb. (2002)
2. Y. YANASE, Y. FUJII, S. OKUMURA, T. YOSHIMURA, and Y. IMAMURA: Detection of Acoustic Emission (AE) Generated by The Feeding Activity of Drywood Termite. Proc. of The Fourth International Wood Science Symposium, Serpong, 2-5 Sep. P114-120, (2002)
3. Y. Indrayani, Y. YANASE, Y. FUJII, T. YOSHIMURA, and Y. IMAMURA: Acoustic emission (AE) Monitoring of Dry-Wood Termite Feeding Activities Under Various Relative Humidity (RH) Conditions. Proc. of The Fourth International Wood Science Symposium, Serpong, 2-5 Sep. P107-112, (2002)
4. Y. Fujiwara, Y. Fujii, and S. Okumura: Robust Gaussian filter and three-dimensional parameters

- to evaluate wood surface roughness as related to tactile roughness. Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 359-365, (2003)
5. Y. Fujii, S. Okumura, M. Inoue, and K. Adachi: FE-analysis of roll pressing of wood. Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 410-413, (2003)
  6. K. Kuriyama, Y. Sawada, Y. Fujii, and S. Okumura: Deformation and temperature rise of type-II chips in 90-0 cutting of wood. Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 423-429, (2003)
  7. K. Fujino, Y. Sawada, Y. Fujii, and S. Okumura: Machining of curved surface of wood by ball end mill -Effects of rake angle and feed speed on machined surface- Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 532-538, (2003)
  8. Y. Sawada, A. Ohori, H. Kitamura, Y. Fujii, and S. Okumura: Development of NC bandsaw sharpening machine equipped with pattern recognition function for automatic diagnose of grinding state. -The performance of prototype machine and pattern recognition of grinding vibration using RCE-network- Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 571-576, (2003)
  9. Y. Yanase, Y. Fujii, and S. Okumura: Detection of acoustic emission (AE) using polyvinilidene fluoride (PVDF) film. -Attenuation of AE wave in wood and wood-based materials- Proc. of 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, 665-66, (2003)

### (3)出版物

1. 藤井義久：住宅の劣化診断と維持管理（分担執筆）. 3.資源リサイクル時代の木材保存技術、日本木材学会第8期分科会報告書 pp.44-50、日本木材学会、東京、(2004)
2. 藤井義久：実務者のための住宅の腐朽・虫害の診断マニュアル（分担執筆）、（社）日本木材保存協会、東京、(2004)
3. 藤井義久：シックハウス症候群とその対策（分担執筆） 吉川敏一編、（株）オーム社（2005）
4. 藤井義久：含浸過程の評価・解析と応用、第2編 第2章 木材（分担執筆）、（株）テクノシステム（印刷中）

### 研究成果による工業所有権の出願状況

工業所有権の名称	発明者	権利者	工業所有権の種類、番号	出願年月日
物体透視装置	藤井義久ら	NTT	出願中	2004年3月10日

## 1. AE 法およびレーダ探査による文化財の生物劣化の検出

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の目的

昨今、既存住宅の性能評価方法の確立をめざした活動が、住宅の生産や流通関連の業界や関連団体で活発になりつつある。そこでは初期不良を含めて住宅の劣化程度を評価する手法が、建築関係の専門家の間で検討されている。しかし依然として課題となるのが、腐朽や虫害等の生物劣化の判定や評価である。生物劣化のうち住宅での腐朽やシロアリ被害の診断は、現場での目視検査に依存するところが大きい。生物劣化の有無、種類や程度、住宅強度との関連、被害が痕跡か進行性かの判断などには、高度な知識と経験が必要である。またこれらの判断は、定性的な所見の形態をとるものが殆どで、被害程度を客観的に数量化したり、住宅の強度性能や寿命への影響を定量的に評価できるものではない。これらの課題や問題点を背景とし、AE（アコースティック・エミッション）法とレーダ探査方法の2種類の技術を利用し、木質住宅における腐朽や虫害等の生物劣化部位を非破壊で検出し、評価することを検討する。

#### 1.2 研究概要

AE 法とは、材料科学の分野で発達してきた手法で、材料内部で起きる破壊の進行過程を連続的に非破壊的に監視する方法である。AE 計測では、破壊によって生じる振動である AE 波を高感度センサで検出する。AE 波の最も身近な例は地震波であり、AE 計測は地震計による地震波の検出を材料レベルにまでスケールダウンしたものと言える。内部に亀裂などの欠点のある材料に荷重をかけると、健全材料に比べてより低い荷重で AE が発生するため、AE の消長から材料の強度特性の評価や品質管理が可能になる。また、ガスタンクや橋梁など大型の構造物ではその安全性評価に AE 計測を用いたり、AE の連続計測に基づく保守点検が行われている例がある。林産学の分野でも AE を用いた材質評価や破壊機構の検討がなされている<sup>文1)</sup>。著者らはシロアリなど木材内部を穿孔する害虫が、その口器で木材を噛み砕いたり、食いちぎったりする現象も一種の破壊であると考え、それに伴って発生する AE 波の検出実験を行ってきた。また、AE モニタリングによるシロアリ被害の非破壊的な検出の可能性を明らかにし、実用化に向けた研究開発を行ってきた<sup>文2),3)</sup>。

一方、木造住宅の腐朽及びシロアリ等の虫害による被害の診断をする上で、木材内部の腐朽や虫害による空洞部分の程度を非破壊的に把握する必要がある。本研究では AE 法と併行して、反射型のレーダ探査機の基礎実験及び木造建築物での実用化を考慮した試験を行い、その可能性についても検討した。

### 2. AE モニタリングによる木造建築物のシロアリ被害検出

#### 2.1 現場用 AE 計測装置の概要

本研究のグループは、AE モニタリングによるシロアリ被害の検出を、とりわけ既存住宅での被害の非破壊検出方法として検討し、写真 2-1 のような専門の小型 AE 検出装置を開発してきた（AE 検出器 AE510、丸和バイオケミカル社製）。この装置は本体、AE センサ、センサケーブルからなっている。センサは高感度の振動センサで、ゴムバンドとピン、あるいは接着剤などを使って木材に固定する。センサで検出された AE 信号はケーブルを介し、本体で計測される。本体では予め設定した時間での検出 AE 信号をカウントし、表示する。それぞれの計測点でのカウント数を記録し、最終的にカウント数の多い場所を検出することによって、シロアリ被害部分を決定する。この現場用 AE 計測装置を用い、実際のシロアリ被害を受けた木造建築物での被害位置の把握を目的とした AE 計測調査について紹介する。

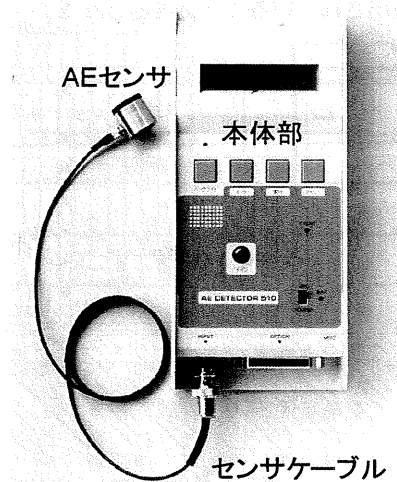


写真 2-1 現場用小型 AE 検出装置 (AE510)

#### 2.2 和歌山県西牟婁郡すさみ町 W 氏邸

##### 2.2.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅では、今回の調査の 5,6 年前から砂粒状の虫糞が確認され、主に乾燥材を被害するアメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes Minor* (Hagen)) による被害が進行していると推定された。予備調査の結果、玄関扉の枠材、屋根の垂木、破風板、和室の床下部材、窓枠、雨戸、および天井裏の部材などで虫糞または被害痕が発見されたが、シロアリは見つからなかった。しかし、本住宅では床下、一階部さらに屋根部にまでアメリカカンザイシロアリの被害が進行しているものと推定された。

虫糞や食害痕が発見された床下では土台、大引き、根太を中心に、また玄関の枠材、屋根の垂木、破風板、窓の枠材、雨戸、戸袋、および天井裏の部材などについても AE 計測を試みた。AE が検出された部位については最終的に生物シロアリ駆除剤（バイオプラスト、丸和バイオケミカル(株)）による注入処理を行った。

## 2.2.2 AE 計測結果と考察

AE が検出された和室の南側壁面の柱、および床下の根太、土台についての計測結果を図 2-1 に示す。●は AE が検出された測定点を表し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数（AE 事象率）を、×は AE 事象率が 10 以下であった測定点を示す。また矢印はその方向へ AE センサを取り付けて計測した AE 測定点を示し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数を示す。柱 C3 での 3 分間あたりの AE 事象数（以下 AE 事象率とする）は、最も大きい部分で 371 であったことから、この近傍でシロアリの食害が起こっていると推定した。さらにその周辺部分で計測した結果、AE 事象率 371 の計測点から距離が長くなるにつれて、184、50、16 と AE 事象率は減少し、オシロスコープによる波形の同時観察より、事象率 371 の計測点付近で発生した AE が柱中を伝搬して、他の部分でも検出されていることが確認された。

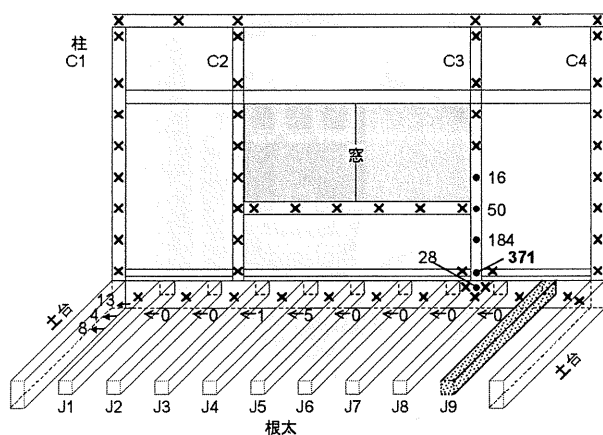


図 2-1 和室における AE 計測結果

また、根太 J9（気乾スギ材、断面 55×55 mm、繊維方向長さ 3000 mm）については、他の根太と比べて、きわめて AE 事象率が大きく、この根太についての計測結果は別に図 2-2 に示す。図の示すように、根太 J9 の端部から中央に向かって AE 事象率が大きくなり、中心部位での食害活動が活発であると考えられる。また、根太 J9 に接する大引、土台とも AE 計測を行ったが、AE は検出されず、根太 J9 の中に一つのコロニーが存在し、その中で食害活動が行われていると推定された。AE 計測後根太 J9 を取り外し、観察した結果、多くのアメリカカンザイシロアリが確認された。AE 計測後、AE 事象率の大き

かった部分については薬剤による穿孔注入処理を行った。薬剤処理後約 1 ヶ月の 9 月 1、2 日に再度 AE 計測を行った結果、前回の測定で AE が検出された計測点では、AE 事象率はほとんど 10 以下であった。このことから、AE が検出された部分については薬剤処理によってアメリカカンザイシロアリは死滅したと判断した。

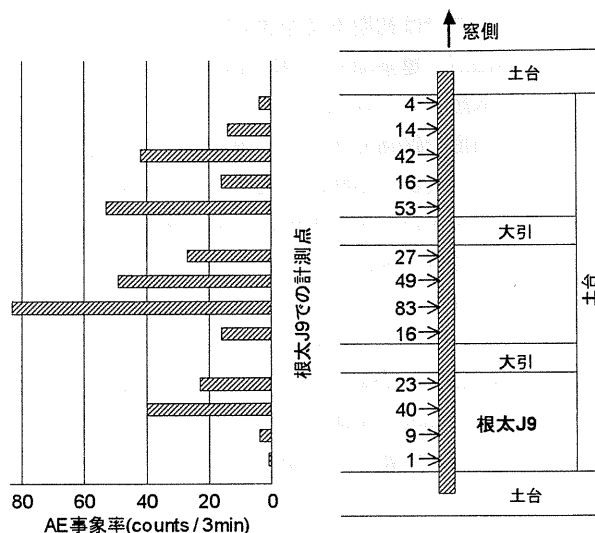


図 2-2 根太 J9 における AE 事象率の分布

家屋の外壁、窓等、特に南、東面側についての AE 計測結果を図 2-3 と 2-4 に示す。南側では、窓 A の戸板の枠材（AE 事象率 6、20）、および窓 B の上部（AE 事象率 14、26）において AE が検出された。窓 A の戸板については、計測後に戸袋から取り出して計測した結果、戸板の枠材全体から AE が検出され、また材中にシロアリも確認された。また、窓 B の上部で AE が検出された部分を穿孔した結果、内部に蟻道が確認されたが、シロアリは確認できなかった。その後薬剤注入処理をし、約 1 ヶ月後に再度計測を行ったが、AE は検出されなかった。

また東側の窓 C についても、戸板の枠材の 3 箇所でも 10 以上の AE 事象率となった。この窓についても戸板以外からは AE はほとんど検出されず、戸板の中でひとつのコロニーが生息していると推定された。この戸板についても、戸袋から取り出し、再度枠材を計測した結果、全体で AE が検出され、シロアリの存在も確認された。

今回の調査では、天井裏、店舗内、和室等でも計測を行ったが、ほとんど AE が検出されなかった。また、AE が検出された部分のみ少量の薬剤で穿孔注入処理を行い、その部分について約 1 ヶ月後に再度計測を行ったが、AE は検出されず、薬剤の効果も確認できた。AE 計測を行った部分については、アメリカカンザイシロアリの食害活動を検出し、その被害の分布も把握できた。



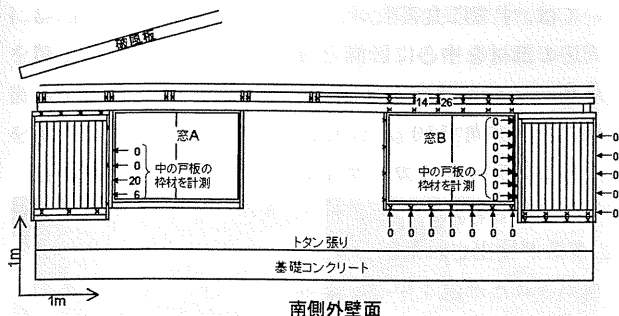


図 2-3 窓 A, B 周辺における AE 計測結果

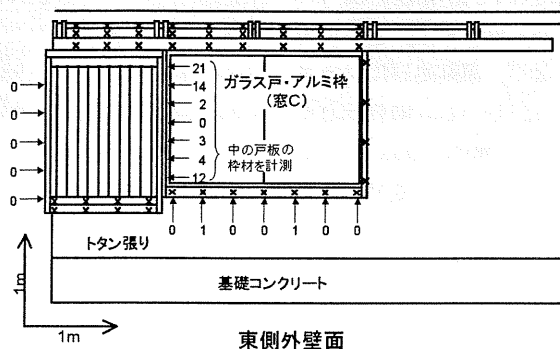


図 2-4 窓 C 周辺における AE 計測結果

## 2.3 和歌山県那賀郡貴志川町 K 氏邸

### 2.3.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅は二階建の戸建住宅（図 2-5）で、2000 年の 7 月に浴室で羽アリの群飛が確認された。予備調査の結果で、住宅の外壁面などに蟻道が発見され、一階和室の柱材、脱衣場側の壁面（浴室との隔壁）、二階北東の洋室の柱等についてはイエシロアリ (*Copoterms formosanus* Shiraki) による被害が確認された。

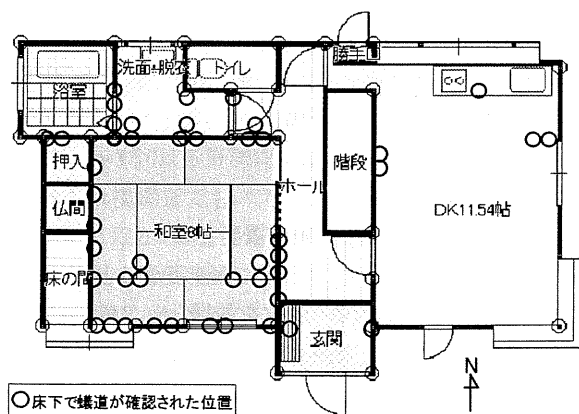


図 2-5 和歌山県那賀郡貴志川町 K 邸（一階平面図）

さらに図 2-5 のように床下において、特に和室、脱衣場、浴室周辺で約 50 の蟻道が発見され、蟻道内にはシロアリの存在も確認された。浴室周辺を中心として、水平方向には脱衣所、和室に向かって、さらには二階へと食

害が進行していると推定された。調査建物について、AE 計測を行い、計測後、AE が検出された部分を中心に薬剤による防除処理を行った。

### 2.3.2 AE 計測結果と考察

図 2-6 は床下での AE 計測の結果を示す。●は AE が検出された測定点を表し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数（AE 事象率）を、×は AE 事象率が 10 以下であった測定点を示す。図中の点線で囲まれた領域 A（浴室と脱衣場周辺）、B（和室の南側）、C（玄関上がり框周辺）では 3 分間あたりの AE 事象数がそれぞれ最大 475、141、810 であった。これらの領域内における計測点での AE 事象率は、他の計測点と比較して明らかに高く、この近傍でシロアリの食害が起きていると推定した。床下において、広範囲に渡って蟻道とシロアリの存在が確認されたが、AE 計測の結果、特にシロアリの食害活動が激しい部分は図中の領域 A、B、C であることがわかり、一階の柱等について、これらの領域 A-C の近傍を中心に AE 計測を行った。

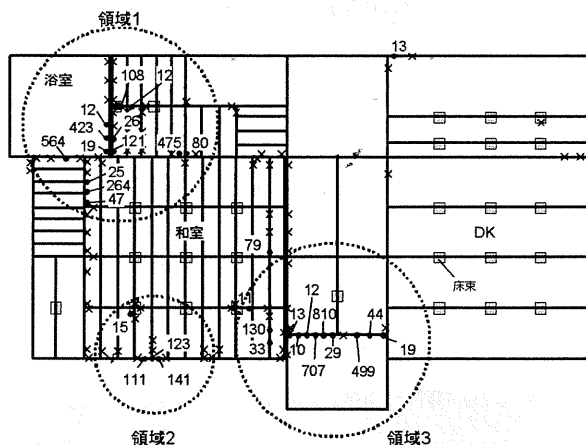


図 2-6 床下部材での AE 計測結果

図 2-7 は和室の柱等における AE 計測結果を示す。浴室、脱衣場に面する押入周辺の柱 1、2 および壁面において最大 492 の AE 事象率が検出された。また図 2-6 の領域 B 内の柱 3 の下部において最大 109 の AE 事象率が検出され、また床下では AE が検出されなかった領域に含まれる柱 4 についても最大 372 の部分を中心に多くの AE が検出され、激しい食害活動が起きていると考えられる。さらに柱 1-4 以外の柱についても蟻土や被害が確認されているが、ほとんど AE は検出されず、食害活動が激しくないと推測された。

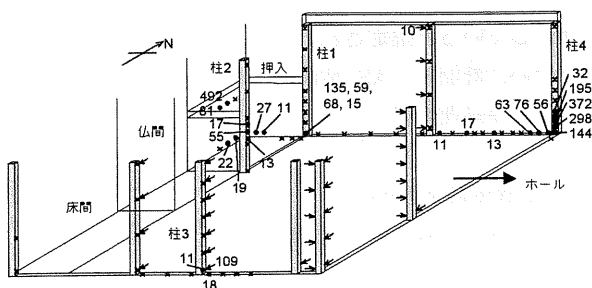


図 2-7 一階和室の柱等におけるAE計測結果

図 2-8 は脱衣場の壁面（浴室との隔壁を含む）における AE 計測結果を示す。壁面内の部材はニードル型ウェーブガイドを用いて計測した。南側、北側の壁面においてはほとんど AE は計測されなかったが、浴室との隔壁である西側の壁面では、浴室入り口周辺の部材で最大 368 の AE が検出された。計測後、図中の点線で囲まれた部分の壁を剥がし、壁内を観察した結果、中は巣状になっていることが確認された。すべての計測後、薬剤による土壌処理、および AE が検出された柱等へ穿孔注入処理を行い、約 1 ヶ月後に再度 AE 計測を行った結果では、AE はほとんど計測されず、シロアリは死滅したと判断した。

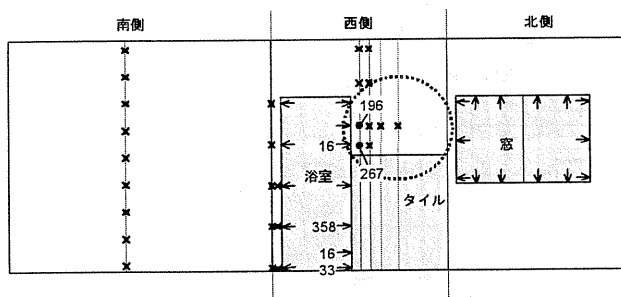


図 2-8 脱衣場側の壁面(浴室との隔壁)におけるAE計測結果

## 2.4 兵庫県宝塚市 T 氏邸

### 2.4.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅は数年前からアメリカカンザイシロアリの羽アリが発見されており、被害が進行していると推察されている。予備調査の結果、一階、二階の天井裏の小屋組材、一階南東の板間の柱、二階寝室南側の壁面内の間柱、南側軒先の鼻隠材など、特に建物の南面において、アメリカカンザイシロアリの被害や虫糞が多数確認された。調査建物において、被害や虫糞が発見された部分を中心に AE 計測を行い、食害部位の検出を行った。

### 2.4.2 AE 計測結果と考察

図 2-9 は一階南東の板間 A の柱等における AE 計測の結果を示す。図中の数字は 3 分間当りの AE 事象発生数を示し、下線の数字は薬剤処理後 1 日経ってからの計測結果を示す。柱 1 の下部に虫糞が発見され、また柱 3 に

ついては、すでに食害痕が目視でき状況であった。柱 1-3 と周辺の部材を中心に計測を行った結果、柱 2 で 3 分間に最高 46 の AE 事象が検出された。またその部分を中心に柱の上下方向で 10 以上の AE 事象が検出されたことから、柱 2 にアメリカカンザイシロアリのコロニーが存在すると推定された。さらに柱 1, 3 についても 10 以上の AE 事象が検出された部分があった。特に 10 以上の AE が検出された部位を中心に薬剤の穿孔注入を行い、薬剤の効果をみるために、翌日再度 AE 計測を行った。柱 2 で最高 46 の AE 事象が検出された部分では、ほとんど AE は検出されなかった。また柱 1, 3 についても前日 10 以上の AE が検出された部分で再度 AE が検出されることはなく、薬剤処理によってシロアリが死滅したと考えられる。しかし、前日ほとんど AE が検出されなかった窓の下枠部材で 10 以上の AE が検出されたため、部材を取り外して内部を観察した結果、アメリカカンザイシロアリが確認された。

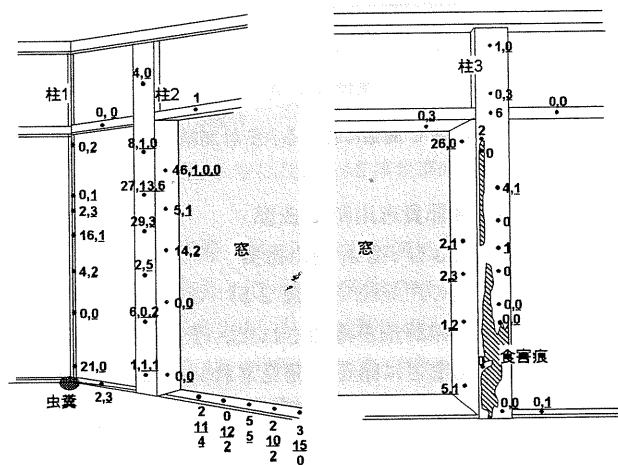


図 2-9 一階の板間におけるAE計測結果

さらに、本住宅において、一階、二階の天井裏の小屋組材、二階寝室の南側壁面内の間柱、南側軒先の鼻隠材などについても AE 計測を行ったが、10 以上の AE 事象が検出された部分はほとんどなかった。

## 2.5 岡山県倉敷市 M 氏邸

### 2.5.1 調査建物および AE 計測の概要

本住宅はすでにイエシロアリによる被害がひどく、住居者はいないという状態で、解体を前提とし、その前にシロアリの駆除を行う必要があった。駆除方法として、近年レスケミカル工法として利用されているベイト工法を採用した。写真 2-2 のように建物周辺にベイトステーション（餌木を入れたカップ上の容器）を埋設し、そのうち 10 箇所のステーションについては、それぞれ容器内の餌木 1 本に AE センサを取付け、定期的にステーション内へのシロアリ侵入をモニタリングした（図 2-10）。最終的にステーションに遅効性薬剤を投入し、浴室下部

にある巣まで薬剤を運搬させ、巣全体を死滅させる方法を行った。この際、巣の死滅を確認するため、薬剤投入後もベイトステーション内において、AE モニタリングを行った。

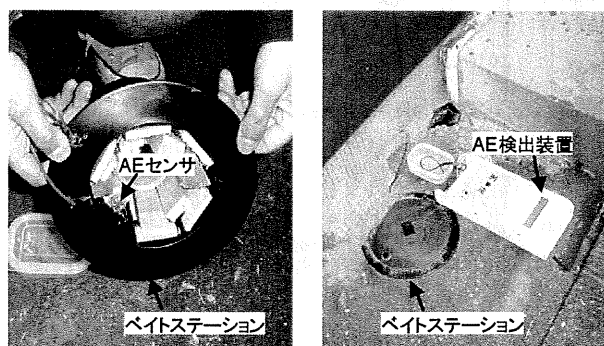


写真 2-2 ベイトステーションとAE センサの設置

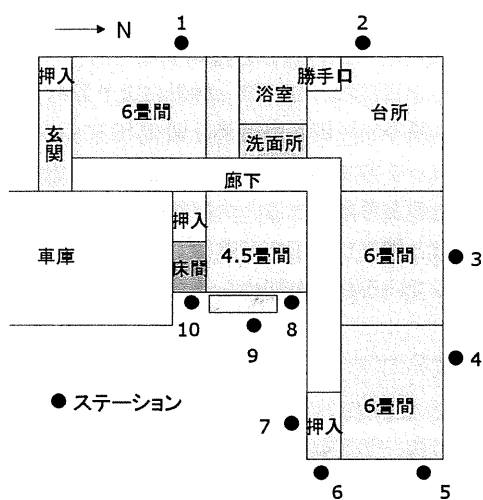


図 2-10 家屋周辺のベイトステーション設置箇所

## 2.5.2 AE 計測結果と考察

表 2-1 に、各ステーションにおける約 1 ヶ月ごとに定期計測（計 8 回の計測）した 3 分間当りの AE 事象発生数を示す。表中の下線の数字は計測後の目視によって、ステーションへのシロアリの侵入が確認されたことを示している。1～3 回目の計測までは、AE が全く検出されず、計測後の目視調査でもステーションへのシロアリの侵入は確認されなかった。4 回目の計測では 6 つのステーションで AE が検出され、どのステーションにもシロアリの侵入が確認されたが、シロアリが侵入しているにもかかわらず、AE が検出されなかったステーションが 2 つあった。ステーション内のシロアリの頭数が少ないことから、AE センサが 1 本の餌木にのみ取り付けられていることから、AE が検出されなかったと考えられる。5 回目の計測に関しては全てのステーションでシロアリが確認され、さらにシロアリの食害が激しく、センサを取り付けた餌木がほとんど食害されてしまったため、AE 検出が困難な状態のものもあり、再度餌木の追加、センサの付け直

しを行った。6 回目以降はシロアリの侵入が確認されたステーションが 3 つにまで減少し、検出された AE 事象数も減少した。現在別のステーション 3 つに遅効性薬剤を投入し、シロアリに対する薬剤の効果を AE によって評価するため、定期計測を継続中である。

表 2-1 各ステーションにおける 3 分間当りの AE 事象発生数

センサ No.	1 回	2 回	3 回	4 回	5 回	6 回	7 回	8 回
1	0	0	0	<u>5</u>	<u>264</u>	<u>12</u>	<u>0</u>	<u>3</u>
2	0	0	0	<u>61</u>	<u>51</u>	<u>30</u>	<u>4</u>	<u>0</u>
3	0	0	0	0	<u>0</u>	0	0	0
4	0	0	0	<u>0</u>	<u>0</u>	0	0	0
5	0	0	0	<u>0</u>	<u>0</u>	0	0	0
6	0	0	0	0	<u>0</u>	0	0	0
7	0	0	0	<u>32</u>	<u>4</u>	0	0	0
8	0	0	0	<u>2</u>	<u>0</u>	0	0	0
9	0	0	0	<u>25</u>	<u>1</u>	0	0	0
10	0	0	0	<u>17</u>	<u>13</u>	0	<u>0</u>	<u>4</u>

## 2.6 山口県下関市功山寺仏殿(国宝)

### 2.6.1 調査建築物の概要と目視検査結果

須弥壇土台（内側）、来迎壁・来迎柱の脚元、来迎壁上端の梁とその周囲部材、須弥壇北側の柱の下端および礎盤について、現在進行中の食害およびシロアリは確認されなかったが、古い食害痕および蟻道が認められた（写真 2-3）。また一部腐朽を伴った上で相当食害が進行していた。目視検査の結果より、AE によるシロアリ食害検出と礎盤については打診・触針によって、劣化の程度を判定した。

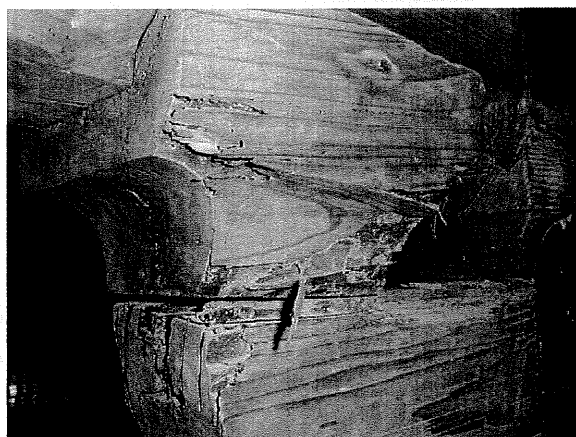


写真 2-3 シロアリによる巻斗などの被害

### 2.6.2 AE 計測によるシロアリ食害の検出結果

図 2-11 のように、仏殿内の礎盤及び柱下部の四方位から AE センサを取付け、それぞれの測定点で 3 分間 AE 計測を行った計測した結果を表 2-2 に示す。全ての計測

点について、AE が検出された部分が 2 箇所で見られたが、再度計測すると AE は検出されず、電気的なノイズ等を計測していたと推定した。したがって、シロアリの食害活動と関連付けられる AE は検出されず、シロアリの食害痕は目視調査によって確認されたが、現在進行するシロアリの食害ではないと判断した。

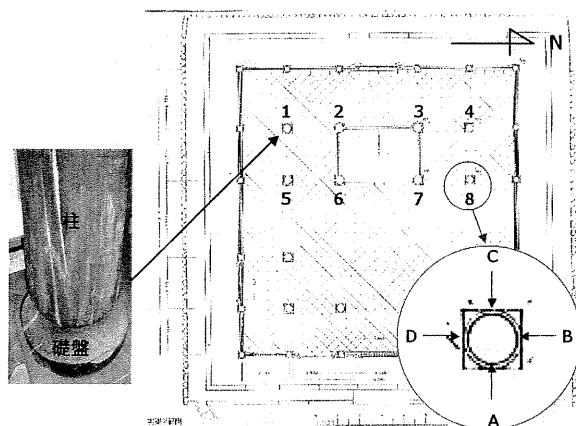


図 2-11 各柱の礎盤及び柱下部における AE 計測部分

表 2-2 各柱の礎盤、柱下における 3 分間あたりの AE 事象数

		A	B	C	D
柱 1	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 2	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 3	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 4	礎盤	0	0	1, 0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 5	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 6	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 7	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	0	0
柱 8	礎盤	0	0	0	0
	柱下	0	0	2, 0	0

図 2-12 に須弥壇及び周囲壁の土台、周囲柱の礎盤、扉の軸を受けるわら座での AE 計測結果を示す。×は AE 計測点を示し、そこでの数字は 3 分間あたりの AE 事象数を示す。3 分間に 10 以上の AE 事象数を示した部分は見られず、シロアリの食害はないと推測される。目視調査の結果と合わせると、仏殿内で、食害痕や蟻道等が確認されたが、これらは以前にシロアリの被害があった痕跡であり、進行中のシロアリ食害は確認されなかった。

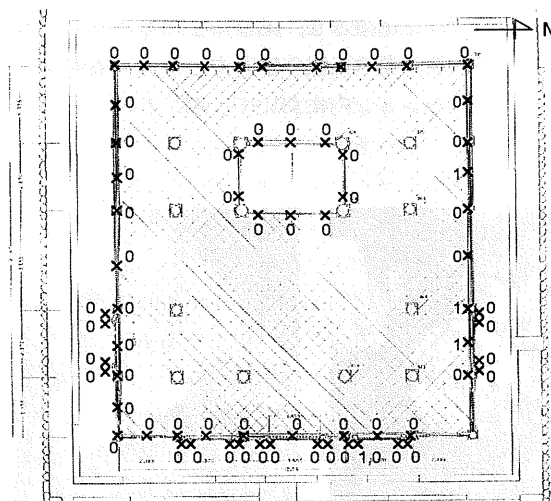


図 2-12 須弥壇の土台、仏殿周囲の礎盤、わら座の AE 計測結果

### 2.6.3 腐朽等による劣化の打診・触針判定

礎盤の劣化を目視および打診・触針により診断し、腐朽の程度を 4 段階で評価した結果を図 2-13 に示す。礎石の結露等によって含水率が上がり、礎盤の下端から腐朽が進行したものと考えられる。一部須弥壇周囲の柱ではシロアリ食害と併行して腐朽が進行し、礎盤が圧縮変形し、柱が沈んでいるものが認められた。

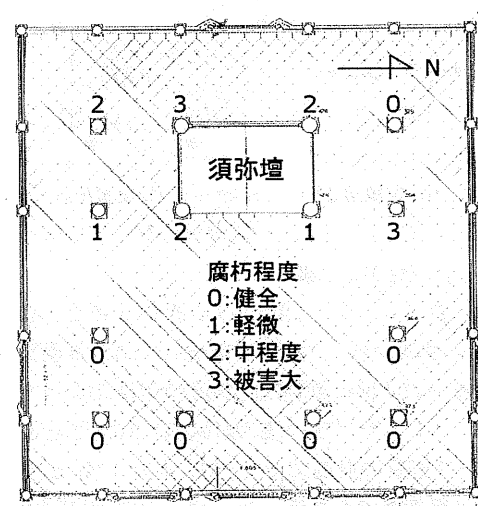


図 2-13 仏殿内の礎盤の劣化の目視および打診・触針判定

### 2.6.4 本建物の生物劣化低減の措置

今回の目視調査及び AE 計測によるシロアリ食害の検出結果、進行中のシロアリ被害は見られなかったが、礎盤の腐朽進行が確認され、これを抑制する必要が認められた。

その対策としては、

- 1) ホウ酸スティックの打ち込み法が対策として考えられる。
- 2) 樹脂の注入は強度補強としての効果が期待できるが、

その場合でも残った木部の腐朽の抑制措置が望まれる。

- 3) 礎盤を取替える場合にも、何らかの防腐処理を施した材料を用いることが望まれる。外壁下の土台、礎盤についても腐朽が相当進行しているため、シロアリ被害の予防を含めた防腐処理が望まれる。

### 3. AEによるシロアリ被害の非破壊診断方法の確立

前章では建物内でのシロアリの被害を非破壊的に検出する手法としてのAEモニタリング技術を紹介してきた。小型のAE検出器を活用することによって、既存の建物における進行中のシロアリ被害を、効率よくかつ定性ならびに定量的に評価することが可能である。またシロアリ駆除後にAE計測を行うことによって、駆除効果を評価することもできる。さらにAE計測は、駆除後の定期的な点検やメンテナンスのためのツールとしても活用できる。昨今では、ベイト工法に見られるように定期的な点検業務を伴うような防除方法が一般化しつつある。しかし新旧いずれの防除工法でも、定期的な点検や監視を伴った形態での防除の必要性が認識されつつある。本章では、定期点検の重要性が認識されつつある背景を探りながら、検出手段というよりはむしろ点検や監視手段としてのAEモニタリングの可能性を検討する。

#### 3.1 理想的なシロアリ防除

理想的なシロアリ防除とは、以下のような条件を満たしていなければならない。

- 1) 建物へのシロアリ被害を十分抑止できること。  
被害のない建物については十分な予防効果があり、加害されている建物については、そこに生息するシロアリを速やかに駆除できることが望まれる。
- 2) 人や環境・生態系への影響がないこと。  
シックハウス症候群、VOC、化学物質過敏症や環境ホルモンなどとの関連で、昨今最も関心注目されている点である。化学薬剤を床下に散布したり、建物の部材に吹付け・塗装や穿孔注入した際に、揮発して発生する成分、周囲の土壌に浸潤・流出する成分の人体や環境への影響が懸念されている。これらを背景として、より毒性の低い化学薬剤を限定的に使用する方法や、化学薬剤に依存しない防除方法等が検討され、実用化されつつある。
- 3) 上記の2項目が持続的に実現できること。

住宅の性能保証との関連で、シロアリ防除の効果がより長期にわたって持続することが望まれている。しかし化学薬剤による防除方法では、即効性、確実性、残効性や持続性のある薬剤ほど、一般的には人や環境への影響が憂慮される傾向にあり、安易に「性能・効果」の高い薬剤によって長期にわたる防除効

果を実現することは期待できない。これらを背景として、定期点検を伴った維持管理による実質的な長期の住宅性能の確保や、それを可能ならしめるための家づくり、すなわち点検しやすい構造や材料、修復やリフォームのし易い構造や材料の必要性が認識されつつある。これらにより、被害の早期発見・早期処置が可能になり、例え「性能・効果」の低い化学薬剤による防除でも、住宅の実質的な高耐久化が実現できる。

- 4) 経済的であること。

対費用効果の優れた防除方法であることが望まれる。

#### 3.2 ベイト工法とAEモニタリング

近年新規な防除工法としてベイト工法が普及しつつある。防除対象となる建物の周囲土壌に、ステーションと称する容器を複数埋設し、これを利用してシロアリを駆除する。容器にはシロアリが出入りできる空隙や穴を設けておき、容器内には、餌（ベイト）となる木材・木粉や誘引物質を入れ、シロアリを誘引し、誘引できたところで順次餌を駆除剤入りの餌に置き換える方法である。シロアリに取り込まれた駆除剤は、シロアリどうしの接触や栄養補給を通じて順次コロニー内に伝わり、最終的には巣を中心とするコロニー全体を壊滅させる。駆除剤には、脱皮阻害剤など、遅効性の薬剤が使用される。この方法は、大量の薬剤散布を行わない、特にイエシロアリの駆除で課題となる巣の駆除について、その位置を知らなくても駆除できる、マニュアル化が容易である、などの利点がある。しかし、ステーションの設置位置や方法が適切でないとシロアリを誘引できない、駆除に時間がかかる、駆除効果を確認し難いなどの欠点もある。とりわけ問題となるのが餌の交換時期を知るため、ステーションを定期的に点検する必要があることで、そのために作業員が複数回現場に足を向けなければならない点である。餌の交換のためには現場に出向かなければならないが、点検にかかる時間と費用は相当な量になると考えられる。これを解決する方法の一つに、ステーション内へのシロアリの侵入、摂食行動、ステーション内の環境を遠隔地から自動的に監視する手法であり、そのためにAEモニタリングが活用できる。

#### 3.3 インターネット対応型AEモニタリング

AEモニタリングを用いた人工的な餌場におけるシロアリの摂食行動の連続監視については、すでに本研究のグループが電力事業所におけるシロアリ監視技術としてその原型となる手法を確立している。また同様の手法を樹木内のイエシロアリのコロニーに適用しコロニー内での環境やシロアリ生態の研究に活用している。そこではAEデータだけでなく、コロニー内の温度などのデータ



も計測している。これらの方法では、小型の AE 計測器や温度センサからのデータを、現場に設置した記録計やデータロガーなどに蓄積し、それを後日回収し分析・評価することになっていた。それを発展させる形で、データを無線信号として発信したり、電話回線を通じて収集することが考えられる。本研究では、現時点で最も汎用性および発展性が高く、また普及速度の速いインターネットを介した AE データの収集システムを考案し、そのプロトタイプを設計・試作した。

### 3.3.1 インターネット対応型 AE モニタリングの基本仕様

図 3-1 に本研究で開発、試作したシステムの概要を示す。住宅の現場には、AE センサおよびセンサからの信号処理装置を最大 4 セット設置できる。信号処理装置は前章までで紹介した小型の AE 検出器である。これら装置からの AE 事象信号は AE イベントアダプタおよび現場用 CPU を経て、インターネットに流すことができる。現場用 CPU では、各装置からのイベント信号を計数して、一定時間毎の AE 発生率データとして保存し、そのデータを転送するためのソフトウェアが起動している（図 3-2）。データの転送は、インターネットを介して、サーバコンピュータに自動転送されるが、転送手段は、設定した一定時間毎に自動的に FTP または電子メールでの転送となっている。サーバに蓄積されたデータは、インターネットにつながった別のコンピュータや携帯端末でアクセスが可能である。当然複数の現場からのデータもサーバ上で区別して管理されるため、一度に多数の現場での AE 監視が可能であるし、それをどこからでも見ることができる。

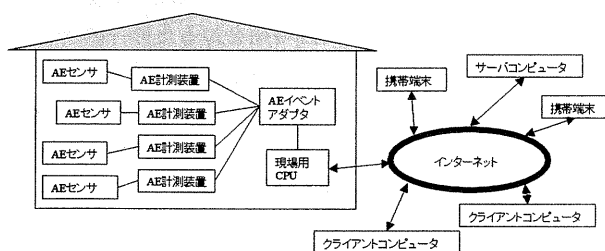


図 3-1 インターネット対応型 AE モニタリングシステム

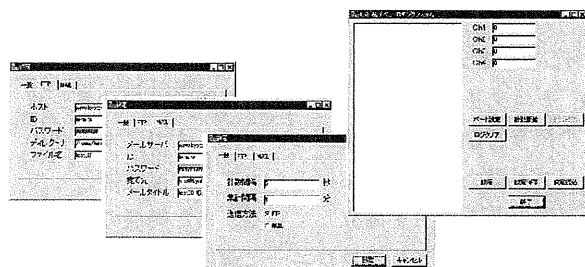


図 3-2 AE データ収集ソフトウェアの制御画面の例

### 3.3.2 システムの利用方法の例

本システムが適用想定される現場には、主にペイト工法が適用される住宅などが想定される。ステーション内の餌木に AE センサをつけておき、センサからの信号を住宅内に設置したイベントアダプタや CPU で処理する。従来のような薬剤によるシロアリ駆除が適用されるような現場でも、比較的遠隔地にあつて、薬剤処理の前後で長期の監視が必要な場合にも適用できる。

### 3.3.3 今後の改善点

本研究で開発した AE 監視システムは実際の現場での使用に耐えるが、改善すべき点もある。以下にそれらを挙げる。

- 1) 後述するが、収集するデータとして AE 計測値の他に、温度や湿度などの観測量を加えることによってより正確で信頼性の高い食害の監視が可能である。
- 2) 試作システムにおける、現場用の装置をさらに専門化、カスタム化することによってより小型で、多様な現場に対応可能なシステムとすることができる。
- 3) データ収集および監視のソフトウェアについて、現場の管理やデータの分析などの機能を付与することによって、より実際的で能率的なシステムとすることができる。

## 3.4 モニタリング技術の将来展望

### 3.4.1 安価な AE センサについて

本研究で主に採用した AE センサは、圧電性セラミックスである PZT を用いたセンサである。しかし、このセンサは高価で、量産に向かない。センサメーカーによっては、スローアウェイ（使い捨て）方式の比較的廉価なセンサを提供しているところもあるが、それでも量産には向かない。これを解決する方法の一つに圧電性のポリマーをセンサとして使うことが考えられる。その代表がポリフッ化ビニリデン (PVDF) で、PZT に比べて圧電定数が低く、センサとしての感度は 1 桁ほど低い、薄いフィルム状の AE センサとして、木材に接着したり、木材と木材の接合部に挿入して使うことができる。また PZT とは異なり、フィルム状で広い面積を監視できるため、センサとしての実質的な感度は PZT と比べてそれほど遜色はない。本研究のグループは、その基本性能を検討し、シロアリ食害検出用のセンサとして使用できることを確認している。また PVDF センサは、基本的には量産に向き、PZT よりも安価である。今後、PVDF をはじめとする圧電性ポリマーのセンサとしての可能性をさらに検討する必要がある。

### 3.4.2 AE 以外の監視量について

本研究では、ペイトステーションなどでのシロアリ食

害を AE モニタリングで検出する方法をについても述べてきた。しかし、ステーション内にシロアリが侵入して発生する変化には、餌木の被害による AE 発生以外に温度や湿度の変化や、シロアリの代謝によって生じるガス濃度の変化もある。本研究のグループでは、メタン、水素やニオイ選択性のセラミックガスセンサを用いたシロアリの代謝ガスの検出について、その可能性を明らかにしている。温度センサとなる熱電対やサーミスタと並んで、ガスセンサも比較的安価で量産が可能である。AE センサと並んでこれらのセンサを組み合わせることで、ベイトステーション内でのシロアリの活動をより正確に知ることができるといえる。

#### 4. レーダ探査による住宅部材の内部劣化の非破壊診断

木材内部の腐朽や虫害による加害部分を非破壊的に検出する方法として、本研究では反射型のレーダ探査機の可能性を検討した。

##### 4.1 反射型レーダ探査装置

###### 4.1.1 検出原理

木材の表面に接触したレーダ探査機の発信アンテナから電磁波を発信すると、その一部は表面で反射するとともに、一部は木材内部に伝搬する。木材内部に誘電率の境界面（比重の異なる領域どうしの境界面など）が存在すると電磁波はそこで反射する。木材内部に存在する空洞や高含水率部（欠陥部）は、健全な部分（健全部）と比べて誘電率が低いあるいは高いので、これらと健全部との境界面で電磁波は反射し、反射波は受信アンテナに受信される（図 4-1a）。反射の大きさ（反射係数  $R$ ）は次式で表されるように、木材の誘電率と欠陥部の誘電率の差が大きいほど大きくなる。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad \dots(1)$$

ここで  $\epsilon_{r1}$  は木材の誘電率、 $\epsilon_{r2}$  は欠陥部の誘電率である。

なお、木材中を伝わる電磁波の速度  $v$  および減衰率  $\alpha$  は次式で表される。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \alpha = \frac{60\pi}{\rho} \times \sqrt{\epsilon_r} \quad \dots(2)$$

ここで  $\epsilon_r$  は木材の誘電率、 $c$  は光の速度（ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）で、 $\rho$  は木材の比抵抗である。よって、木材の誘電率が高い場合、つまり含水率が高い、あるいは比重が大きいと電磁波の速度は遅くなりかつ減衰しやすくなる。

###### 4.1.2 検出波形の処理と表示

レーダ探査機の受信アンテナで受信された反射波（受信信号）を表示したものを A スコープと呼ぶ。健全部で

の受信信号はレーダ装置底面での反射成分と表面での反射成分からなる信号が検出される（木材内部に達した電磁波成分は木材を透過してしまうので検出されない）。一方、レーダ装置で欠陥部付近を走査すると、前述の波形成分に欠陥部での反射成分を含んだ受信信号が表れ、その変化は健全部での波形信号に対して、その振幅や位相の変化として表れる。

また、この受信信号の振幅を高さ毎に色分けして、受信した順番に並列表示したものが B スコープである。B スコープにより欠陥部の位置や深さをより明確に視覚化できる（図 4-1b）。

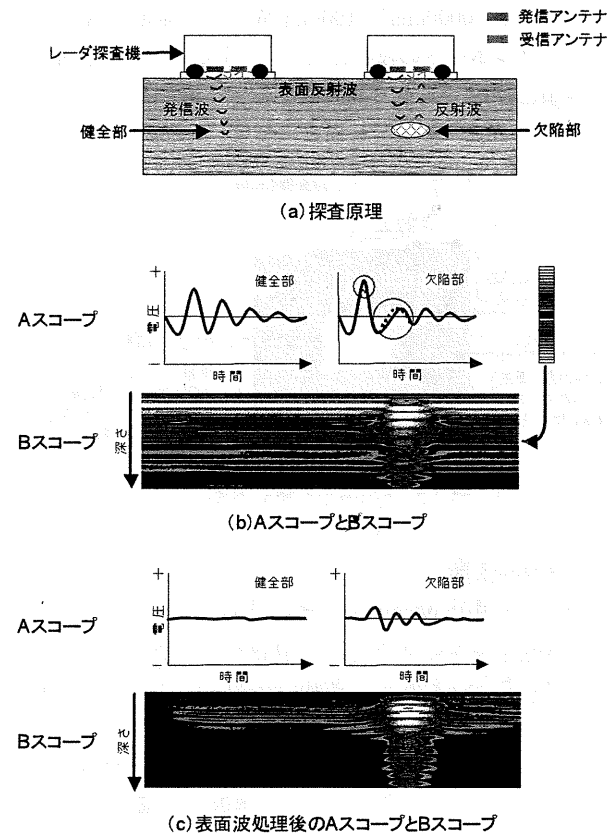


図 4-1 レーダの探査原理とデータ

###### 4.1.3 表面波処理後のデータ

表面波処理とは、受信信号の中から任意に 1 つ受信信号を選び、これを基準信号として、受信信号から基準信号を差し引くことである。健全部の受信信号を基準信号としてこの処理を行うと、健全部では処理後の信号はほぼ平坦になり、欠陥部では欠陥部での反射成分のみの信号となる。よって、欠陥部の存在がより明確に表れる（図 4-1c）。

本研究で使用したレーダ探査機は、レーダ探査機 1G（株）コス製、センシオンプロ、発信周波数 1GHz、発信出力は 10mW）及びレーダ探査機 450M（同、センシオンβ1、発信周波数は 450MHz、発信出力は 10mW）である。

## 4.2 木質材料内の擬似欠点(空洞)の検出

### 4.2.1 実験

木材の腐朽が進行すると、組織が分解され、密度が低下し、最終的には、空洞などの組織の欠落部位が発生する。レーダ探査による木材内部の空洞の検出性を調べるために、積層したパーティクルボードの内部に形成した大きさの異なる空洞の検出を試みた。900mm 角、厚さ 15.5mm のパーティクルボード (気乾比重約 0.73) を 60 枚積み上げ、上面から種々の深さに、中央に正方形の穴をあけたパーティクルボードを 1 から 3 枚挿入しこれを空洞とした。空洞の面積は  $625\text{ mm}^2$  (25mm 角),  $2500\text{ mm}^2$  (50mm 角),  $10000\text{ mm}^2$  (100mm 角) の 3 種類、高さはパーティクルボードの枚数に応じて 15.5, 31.0, 46.5mm の 3 種類とした (図 4-2)。

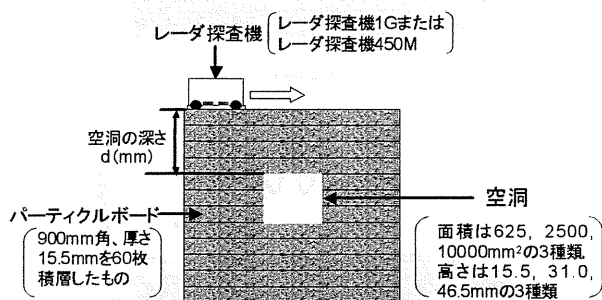


図 4-2 擬似空洞の検出実験

### 4.2.2 結果と考察

図 4-3 に面積が  $10000\text{ mm}^2$ 、高さが 15.5, 31.0, 46.5mm の空洞の検出結果を B スコープで示す。結果はすべて表面波処理したものを示す。空洞の処理信号の大きさは厚さ 1mm の鋼板をボード間に挿入した場合の 10%程度であった。これは乾燥したパーティクルボードと空洞の誘電率の差が、パーティクルボードと鋼板の誘電率の差よりも小さく、電磁波が反射しにくかったためと考えられる。また背の高い空洞ほど検出性は高く、高さ 46.5mm の空洞は約 160mm の位置まで検出できた。レーダ探査機 450M で用いている長波長の電磁波は、より深くまで木材内部に入るので、深い位置の空洞を検出できると考えられる。しかし空洞のない部分での処理信号と空洞のある部分での処理信号の差が小さく、到達深度は不明確であった。

レーダ探査機 1G を用いた場合、ピーク電圧は空洞の位置が深くなるにしたがって低下した。また空洞が浅い位置では高い空洞ほどピーク電圧は大きい、深くなるにつれてその差は小さくなった。レーダ探査機 450M では、この傾向は見られなかった。ピークの発生時刻は高さにかかわらず空洞の位置が深くなるにしたがって直線的に遅れた。

また空洞の面積は、大きい面積の空洞ほど、電磁波を

反射する面積が大きく、検出性は高かった。面積が  $10000\text{ mm}^2$  の空洞は約 160mm の位置まで、 $2500\text{ mm}^2$  の空洞は約 90mm の位置まで検出できた。一方  $625\text{ mm}^2$  の空洞は、一番浅い位置の 31mm でも検出できなかった。

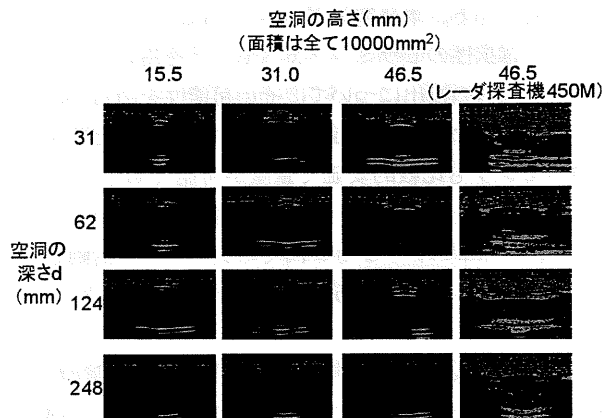


図 4-3 擬似空洞の検出結果(B スコープ)

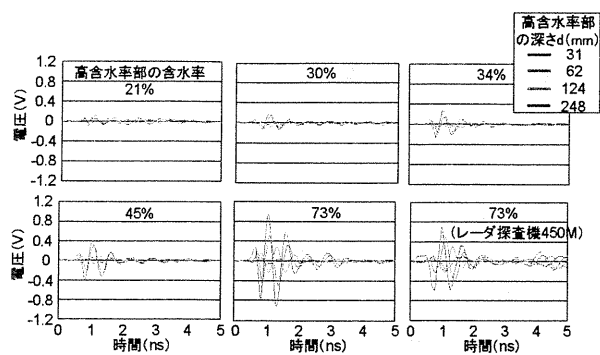
## 4.3 高含水率部の検出

### 4.3.1 実験

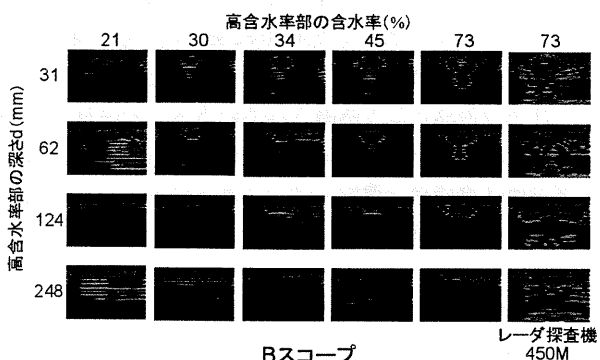
木材内部で、腐朽菌が成長する領域は、その生育条件の一つである水分が豊富であり、含水率の高い部位である。従って、空洞と並んでレーダ探査によって高含水率部位を検出することによって、進行中の内部の腐朽部位や、今後腐朽が進行する可能性のある領域を検出できる。レーダによる高含水率部の検出性を調べるため、積層した乾燥パーティクルボードに高含水率のパーティクルボード片を挿入し、これを検出することを試みた。900mm 角、厚さ 15.5mm のパーティクルボード (気乾比重 0.73) を 60 枚積層し、上面から種々の深さに、中央に 100mm 角の高含水率ボードをはめ込んだボードを 1 枚挿入して、これを高含水率部とした。積層したパーティクルボードの含水率は 10%で、高含水率部の含水率は 21, 30, 34, 45, 73%の 5 種類とした。

### 4.3.2 結果と考察

図 4-4 に高含水率部の検出結果を A スコープおよび B スコープで示す。結果はすべて表面波処理したものを示す。含水率 21%の高含水率部は今回実験した一番浅い位置の 31mm でも検出されなかった。それより高い含水率のものは検出され、含水率が高いものほど検出性は高かった。ピーク電圧は高含水率部の位置が深くなるにしたがって低下した。また含水率が高いほどピーク電圧は大きく、位置が深くなるにつれて含水率によるピーク電圧の差は小さくなった。ピークの発生時刻は含水率にかかわらず、高含水率部の深さに対して直線的に遅れた。レーダ探査機 450M を用いた場合、ピーク電圧は 1G よりも緩やかに低下した。



Aスコープ



Bスコープ

図 4-4 高含水率部の検出結果

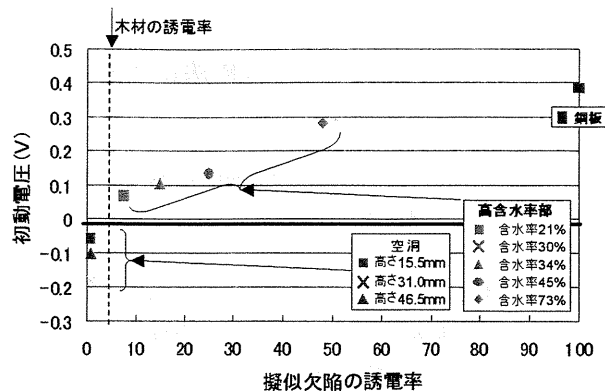


図 4-5 擬似欠陥の誘電率と処理信号の初動電圧変化との関係

## 5. おわりに

住宅の高寿命化を背景として、今後は住宅の点検や診断が必要となってくるものと考えられる。一方でシロアリ及び腐朽に対する薬剤処理については、昨今の環境や健康問題という背景のもと、必要な種類の薬剤を必要最低限度量だけ、必要な時に必要な場所にだけ施工することが求められることとなり、生物劣化の早期発見が必要不可欠となる。従来の目視などに依存した劣化調査に対して、本研究で考究した AE モニタリングおよびレーダ探査技術は、木質住宅における生物劣化を非破壊的に評価する一つの有効な診断技術といえる。AE モニタリングに関しては、実際の住宅におけるシロアリ食害検出が可能であることが確認され、大きな成果を得ることができた。またレーダ探査技術に関しては、基礎的な試験結果をもとに、現在、様々な劣化診断調査を行っている段階であり、今後さらに問題点の抽出とレーダ探査器の改良を検討しながら、実用化に向けて試験を行っていく必要がある。

## 4.4 欠陥の種類の違い

これまで積層したパーティクルボードに、鋼板、空洞および高含水率部といった擬似的な内部欠陥を発生させ、レーダ探査によってそれらの検出の可能性を確かめてきた。いずれの欠陥もある程度の検出性を示したが、得られた結果のうち、とりわけ B スコープでは、欠陥の存在は知りえても、その種類までは判別できない。しかし A スコープでは、媒質（木材）よりも、誘電率が高いか低いかによって、検出波形の性質が異なる。3 種類の欠陥部での処理信号を比較したところ、パーティクルボードより誘電率が高い鋼板や高含水率部の処理信号の初動部分には正のピークが現れ、誘電率が低い空洞では負のピークが現れた。したがって、処理信号の初動部分の極性により、欠陥部の種類をある程度区別できることがわかる。図 4-5 は、3 種類の欠陥の誘電率と処理信号の始めに現れるピーク電圧の関係を表したものである。図中の破線はパーティクルボードの誘電率の値を示す線である。パーティクルボードより誘電率が高い鋼板や高含水率部のピーク電圧は正に、誘電率が低い空洞のそれは負になっていることがわかる。

上述の基礎的実験から、用いた小型レーダ探査装置によって、木材内部に発生した空洞や高含水率部位をある程度検出できることが確認できた。

## 2. AE 法による出土木材の含浸処理過程の監視

### 1 木材のポリエチレングリコール含浸処理

#### 1.1 出土木材の性質と保存処理

##### 1) 木材の基本的性質

木材は、樹木の細胞からなる多孔性の有機高分子複合材料である。多孔性と言われる由縁は、木材が、その細胞が枯死してその内容物が消失し、あとに残った細胞壁からなるハニカムコア構造を持ち、さらには細胞内腔をはじめとする多様な空隙構造を持つことにある(図1)。木材にはスギやヒノキのような針葉樹材と、ナラやブナなどの広葉樹材がある。針葉樹材を構成する細胞の95%は、仮道管と呼ばれる長さ約3mm、直径約30 $\mu$ m、厚さ約3 $\mu$ mほどの紡錘形をした細胞で、これが長さ方向にほぼ規則的に配列した構造となっている。細胞壁には壁孔という丸い穴が多数あいており、ここを通じて各細胞の内腔は隣接する細胞のそれと連絡している。これによって、根から幹、枝さらには葉に至るまでの樹体内での水分通導が可能になるとともに、細胞壁からなるハニカム構造体が巨大な樹体を支えている。広葉樹の場合には、針葉樹に比べて特定の役割をもった組織が発達しており、その細胞の大きさも針葉樹に比べて変動が大きく、主に水分通導を担う道管のほか、樹体を支える繊維細胞などによって構成されている。

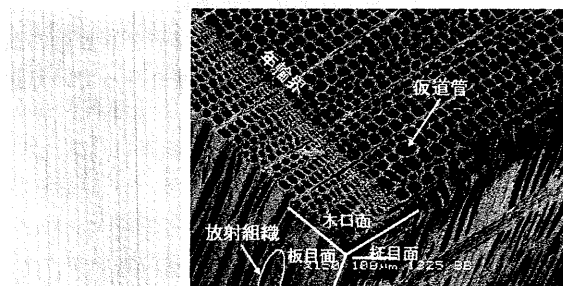


図1 ヒノキ材の柢目面(左)と3断面の電子顕微鏡写真

細胞壁の主要構成成分は、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンといった炭素、酸素および水素からなる有機高分子である。さらに細胞壁の主要部分が、ほぼ樹軸方向(樹木の高さ方向)に配向した直鎖状の結晶性セルロース束(セルロースマイクロフィブリル)からなり、これを充填するようにヘミセルロースやアモルファス状のリグニンがマトリクス状に配置されているという構造の故に、木材は複合材料に位置づけることができる。

木材の力学的特性は、上述の細胞配列や細胞壁の構造に由来して大きな異方性を示す。その例として繊維方向(樹軸方向)の強度が、他の方向に比べて極めて大きい

ことなどが挙げられる。また木材は水分を吸収しやすく、吸収された水分は、細胞内腔に自由水として保持されるだけでなく、細胞壁内にも結合水として保持される。また木材の力学的特性はこの水分状態によっても大きく変化する。また細胞壁への水分の吸着や脱着に際しては、膨潤や収縮といった現象がおき、これが木材の割れ、そりやねじれといった狂いと呼ばれる欠点の原因となる。さらに木材は燃えると言った欠点や、菌類による分解(腐朽)や昆虫による食害といった生物劣化を受ける。しかし、これらの欠点として認識されている木材の性質も、時には湿度調整機能のある材料、燃料となる材料、あるいは使用後は無理なく環境に還元できる材料といった長所としての側面も持つ。

##### 2) 木材の材料改質と含浸処理

古来人間は木材の長所を活かし、欠点を克服するような材料改質の技術開発に傾注してきた。すなわち、狂わない木材、燃えない木材や生物劣化を受けない木材に向けての材質改良技術である。これらの多くは木材の細胞構造の中に、材料改質の元となる薬剤などを含浸したり、注入する技術を軸としている。その一部は寸法安定化木材、不燃・難燃木材、防腐・防虫処理木材として実用に供されている。一方これらの注入や含浸処理技術のうち、含浸処理は、遺跡から発掘された木製遺物の保存処理にも用いられている。本章では、この木製遺物の含浸処理に関するプロセス監視技術の開発事例を紹介する。

##### 3) 出土木材とその性質

出土木材とは遺跡から発掘された木製の遺物で、よく知られているものに木簡(薄い木片や板に文字を書いたもので書状として用いたもの)や修羅(木製のソリで古代の重量物運搬具)などがあるが、この他に様々な道具や建築部材などがある(図2)。多くの出土木材は水分の多い土壌、海底や川底などから水浸状態で発掘され、その細胞組織は菌類などによって劣化(腐朽)している。この状態では細胞内腔は自由水で、細胞壁は結合水で満たされた飽水状態となっている。通常木材を水浸状態に置くと、腐朽菌の活動はむしろ阻害されるため短期的には腐朽などの劣化は起きないが、出土木材の場合は菌類の作用が緩慢な状況にあるとはいうものの、そこに置かれた期間が非常に長いために、通常相当劣化している。現生材(出土木材に対して劣化を受けていない健全材)の細胞壁のセルロースやヘミセルロースの含有率は7割程度であるが、出土木材では腐朽菌によってこれらが分



解しており、その含有率は2割程度にまで低下している（リグニンの分解程度は低い）。しかし出土木材にあっては細胞形態は現生材の状態がほぼ保たれており、見かけは健全な状態とあまり変わらない。出土木材では、細胞壁成分が消失してできた空隙は水分が満たされている。従って出土木材の劣化度はこの水分量（乾燥時の木材重量の飽水状態の重量に対する100分率である最大含水率）や密度によってある程度評価される。ここで「ある程度」と述べたのは、これらの値が樹種に依存するためである。

出土木材を乾燥すると、水分が消失するとともに、腐朽によって脆弱化した細胞壁構造が陥没し（落ち込み）、大きく収縮し、また変形する。現生材の乾燥時の収縮率が最大でも1割以下であるのに対して、出土木材では50%を越える場合もある。また木材の収縮率は丸太の直径方向（放射方向）とその直交方向（年輪の接線方向）とで異なるが（収縮異方性）、その割合も出土木材では現生材に比べて相当大きい。すなわち出土木材を乾燥すると、大きく変形しながら収縮してしまう。従って水浸状態で発掘された出土木材を保存するには、その形状を保ったまま乾燥する技術が必要になる。

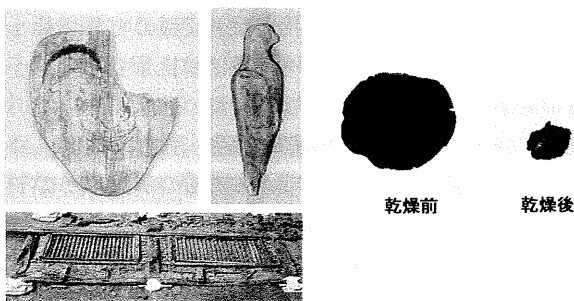


図2 出土木材の例

1) 人面：平城宮跡出土、墨画人面板（8世紀）、2) 鳥形：平城宮跡出土、鳥形木製品（8世紀）、3) 連子窓：山田寺、4) 乾燥前後の出土木材円盤の例

#### 4) 出土木材の保存処理

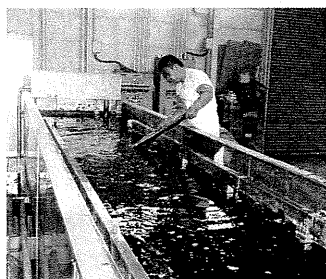
出土木材を保存処理する技術は、19世紀半ばからデンマークで研究され、その後多くの改良が施されて、現在では複数の方法が状況に応じて使い分けられている。いずれも出土木材中に薬剤を浸透させ、これを水分と置換（脱水）し、さらに薬剤を固化させることが基本となっている。用いられる薬剤は、水溶性と非水溶性に分かれ、前者にはポリエチレングリコール（PEG）、ショ糖などの糖類が、後者には炭素数が6以上の高級アルコール類がある。水溶性薬剤を浸透する工程では出土木材を薬剤の水溶液に直接浸漬する方法と、出土木材中の水分を一旦有機溶媒に置換してから浸透する場合があるが、非水溶性薬剤の場合は有機溶媒置換が必要となる。これらの処

理によって、出土木材中での薬剤の浸透と拡散が促進され、順次木材中の水分が、薬剤に置換され、水分が排出する。実際には出土木材の大きさ、木取り、樹種や劣化状態によって、この置換のプロセスは大きく影響される。

含浸用の薬剤は、通常加熱状態の溶液として含浸に用いられ、薬剤の濃度を順次上げてゆき、薬剤と水分との置換（脱水）が十分進んだと思われる時点で、出土木材を浸液から引き上げ、冷却すると薬剤が木材内に固化し、保存処理は終了する。この時木材細胞の内腔には固化した薬剤が充填された状態にあり、出土木材はその細胞構造の形状をとどめたまま強化、乾燥処理されることになる。含浸後の木材を凍結し、これに乾燥した空気を送り込んだり、真空（氷の蒸気圧以下に減圧）して、昇華してきた水分子を除去して乾燥する場合もある。非水溶性薬剤による含浸処理後の乾燥も冷却のみの場合や（真空）凍結乾燥の場合がある。

#### 5) PEGによる出土木材の含浸処理（図3）

出土木材の含浸処理のなかでPEG含浸法は最も一般的な手法である。PEGは $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ で表される高分子化合物である。含浸処理では通常平均分子量が3300のものが用いられ、これは常温で固体、水溶性で、室温で50%程度の水溶液とすることができ、60℃では融解し100%液体となって、出土木材中の水分を完全に置換することができる。含浸に際しては、通常20%程度の水溶液から出発し、ゆっくりと濃度をあげ、出土木材内で薬剤が緩やかに拡散・浸透させる。これは急激な濃度上昇によって、材内での濃度勾配が大きくなりすぎると、部分的に選択的な脱水が進行し、貴重な出土木材が変形・収縮する恐れがあるためである。従って含浸処理に際しては、可能な限り濃度上昇を勾配を緩やかにし、出土木材の変形やひずみの発生には細心の注意が払われることが求められている。結果としてPEG含浸処理には長い時間を要し、ものによっては数年もかかる場合がある。



小型出土木材の場合は  
PEG水溶液に浸漬して  
含浸処理を行う



大型出土木材の場合は  
PEG水溶液のシャワーで  
含浸処理を行う  
(三瓶自然館サヒメル(島根県))

図3 出土木材PEG含浸処理の状況

## 1.2 AE モニタリングと木材

### 1) AE モニタリングと非破壊検査 (図4)

材料が引張、圧縮やせん断などによって破壊する際、亀裂や圧壊などの破壊が進展するサイトでは、応力集中と破壊が繰り返して発生し、そこに蓄積されたひずみエネルギーが断続的に開放される。その一部は熱的エネルギーとなって材料の温度変化となって現れ、また一部は破壊音として放射されたり、振動(弾性波)として材料内を伝搬する。これらの音響や振動は通常インパルス状で、可聴域から超音波領域までの成分を含む。一方、材料に作用する外力が低レベルで、マクロな破壊が発生しなくても、材料内にはミクロな破壊が発生していることが多く、それに伴い、上述のようなメカニズムで微弱な弾性波が発生している。通常これらの弾性波は、その破壊のスケールが小さいが故に、エネルギーレベルが低く、主として超音波領域の成分からなる。このようなマイクロレベルでの破壊に伴って弾性波が発生する現象をアコースティック・エミッション(AE)と呼んでおり、発生した波動をAE波と呼んでいる。AE波は弾性体材料の中では比較よく伝搬するため、例えば材料表面に高感度の振動センサ(AEセンサ)を取り付けておくと、これを検出することができる。破壊の発生点で生じる波動には、縦波や横波の他、表面波などがあるが、AE波として認識されるものは縦波や表面波と考えられる。AEセンサが検出し、測定系が認識する波形は、破壊点で発生したAE波(原波形)が、その伝搬経路の伝達特性やセンサ・信号処理系の特性に応じて変換された波形であり、いわゆる原波形とは異なるが、一般的にはこれをAE波として扱っている。

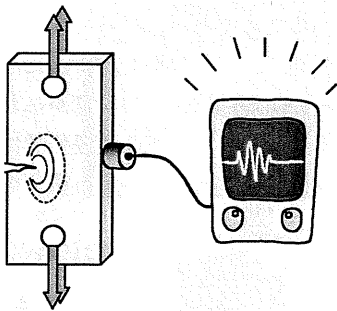


図4 AE モニタリングの概念

AEは、金属のように延性を示す結晶材料では、結晶構造の転移などによっても発生し、コンクリートなどのように脆性を示す材料では主に亀裂の進展によって発生する。このようにAEは材料内で発生および進行するマイクロレベルの破壊に伴って発生するため、破壊力学の分野においては、破壊の進行をモニターするためのツールとして研究されてきた。また低レベルの外力で発生するAEは、材料や構造体が持っている内部的な欠陥と関連

していることが多いため、マクロな破壊に至らない低レベルの外力によるAEの消長を評価(AEモニタリング)することによって、欠陥の存在や発生、強度の推定やこれらに關与する材質特性を非破壊的に評価できる。この手法は厳密には非破壊試験とはいえないが、実用上問題にならない程度の荷重で、欠点などに由来する微弱なAE波を効率よく検出することによって、材料や構造の試験が可能となるため、AEによる非破壊検査の手法は多くの分野で用いられている。また压力容器、貯蔵タンクやコンクリート構造物などの管理分野では、試験時に外力を加えなくても、欠陥があれば、構造体自身の自重や内容物による圧力などによってAEが発生するため、これによって材料や構造体の安全性が評価される。さらに複数のセンサを設置し、それらがAE波を検出した時刻の差、センサの配置や音速から、地震の震源探査の手法と同様にして、AE波の発生源である欠陥の位置を評定することも行われている。

### 2) 木材とAEモニタリング

木材の研究や品質管理においてもAEモニタリングの適用が検討されてきた。その歴史は比較的古く、現在では実用化技術にまで成長しているものもある。これらはAEモニタリングの一般的な適用方法と同様の発想のものもあるし、木材に特有の性質や現象に着目して検討されたものもある。前者については、材料の強度試験時のAEの消長から、木材の破壊機構の解明、強度の推定、欠点の検出や材質の評価をしようとするものがある。この方法は木材素材よりも、合板やパーティクルボードなど、木質エレメントを、接着剤を用いて積層接着させた木質材料の品質管理の手法として検討された。また切削や研削などの機械加工も、人為的で連続的な破壊現象であり、この際にもAEが発生しており、その消長は材料、工具や加工条件に依存し、結果として加工の良否や工具の摩耗状態を評価するパラメータとなりうる。木材加工状態のAEモニタリングによる監視についても基礎的研究を中心に展開が見られた。

後者、すなわち木材特有のAEモニタリング事例として、木材の乾燥過程におけるAEモニタリングを挙げることができる。湿潤状態の木材に熱気中において、材内の水分を拡散、移動や蒸発を促し、自由水や結合水を排除する方法が最も一般的であるが、この方法では乾燥中に生じる材内部での含水率勾配と、それに由来する木材の収縮ひずみの分布が適切に管理されないと、割れや変形などの問題が生じる。これまでの研究から、乾燥中の木材から検出されるAEは、材中の水分移動に由来するものや材の変形や破壊に由来するものがあると考えられ、後者を選択的にモニターすることによって乾燥中に生じる欠点の予知と防止の可能性が検討された。

さらに木材に特異的な AE モニタリングの適用手法として、AE によるシロアリなど木材加害昆虫を検出する技術がある。シロアリは体長数ミリメートルの昆虫であるが、集団で木材をかじり、穿孔することによって強度低下をもたらす。木材がシロアリによって穿孔されるのも微小な破壊であり、この際には AE が発生する。これを捕らえることによってシロアリ被害を非破壊的に検出する方法が考案され、実用化に至っている。

上述のように木材利用の分野でも AE モニタリングが幅広く検討されてきたが、いずれの分野でも実用化に際しては共通の課題があった。それは木材が音響的にも異方性を有する、年輪や繊維などの材質的な特性が伝搬特性を大きく左右する、金属材料などに比べて減衰が大きいなどの特性に由来して、センサの監視範囲が限定されたり、検出信号の意味が判断しにくいなどの問題点である。

### 1.3 AE モニタリングによる木材の含浸保存処理過程の監視

#### 1) 出土木材の含浸処理の問題点と解決策

前述のように、出土木材の含浸保存処理においては、出土品の収縮や変形を避けるために極めて緩やかな濃度上昇勾配での含浸処理をせざるを得ないのが現状である。それでも樹種、大きさ、木取りや劣化状態によってはこれらの欠点が生じたり、乾燥不良などが起きる場合がある。特にアカガシ亜属の樹種や健全部分を残した出土木材などは薬剤の浸透性の悪い樹種で、不良が出やすいとされている。その一方で、貴重な文化財の保存処理といえども、限られた時間と予算の中での処理が求められていることも事実であり、より効率的な含浸処理の開発が望まれている。

その対応の一つとして、含浸処理中の出土木材における浸透・拡散の状態や、変形やひずみの状態がモニターできればより効率的で、損傷のない含浸処理が可能になると考えられる。前述したように AE は、乾燥中の木材の水分移動や割れなどの破壊に由来して発生するので、これを踏まえて、AE モニタリングを用いた出土木材の含浸処理過程の監視の可能性を検討した。以下では、予備実験として行った出土木材の乾燥中に発生する AE 挙動を解説した上で、PEG 含浸処理における AE 検出および濃度上昇に基づく AE 発生の変化を解説し、含浸処理技術の監視技術の可能性を述べる。

#### 2) 木材乾燥中の AE の検出方法

出土木材(スギ *Cryptomeria japonica* D. Don、クリ *Castanea crenata* Sieb. et Zucc.) ((独)奈良文化財研究所提供) および現生スギ材(辺材で飽水状態のもの)から一辺

15mm の立方体状の試験体を作製し、これを 30℃、相対湿度 50% の環境下で乾燥させた時の AE を検出した。

AE 計測には共振周波数 150 kHz の PZT 圧電センサを用いた。センサを直接試験体にとりつけると、乾燥中の試験体の変形や収縮によって、センサと試験体との密着性が損なわれるため、直径 0.6mm の虫ピンを試料の放射方向に突き通し、これをウェーブガイドとして木材からの AE 波を集め、保持具を用いて虫ピンに AE センサを取り付けた。後述するが、これによって乾燥中の木材からの AE や収縮する木材とピンとの摩擦による AE が検出される。(図 5)。AE センサからの信号はプリアンプで 40dB 増幅、50 kHz のハイパスフィルタで波後、メインアンプで 30dB 増幅し(総合利得 70dB)、信号振幅がしきい値 200mV を超えたものを AE 事象として計測し、データログを用いて記録した。記録された AE 事象データは波形観測ソフトによって解析し、AE 事象総数、大振幅 AE の発生率を求めた。また試料の重量をロードセルで計測し、含水率変化を監視するとともに、試料の形状を CCD カメラで連続的に撮影し、撮影画像から変形や木口面の面積収縮率を測定した(図 6)。

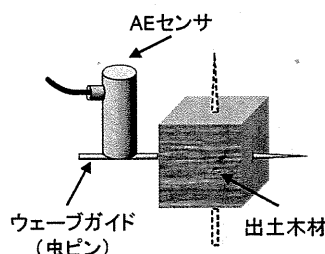


図5 乾燥中の出土木材からの AE 検出

ウェーブガイドは繊維に平行あるいは直交方向に刺す

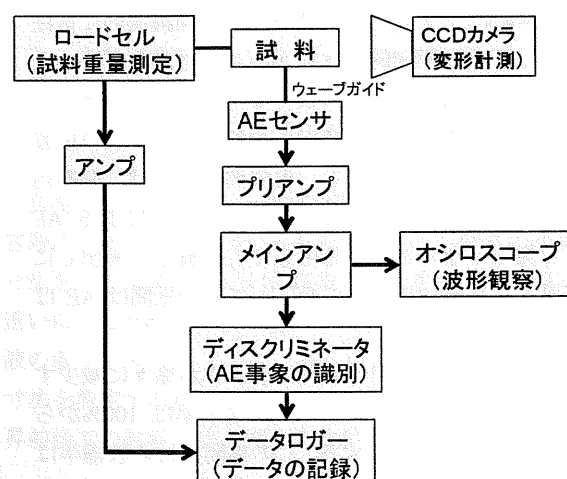
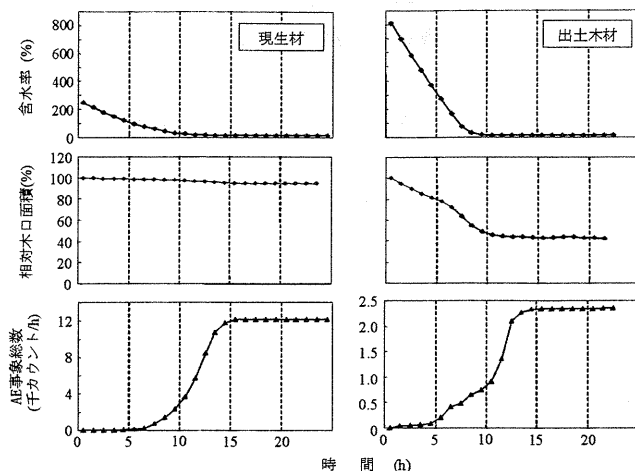


図6 AE 計測系システム概要

図7に、スギの現生材と出土木材を乾燥した時の含水率、相対木口面積、AE 事象総数、大振幅 AE の発生率の



経時変化の例を示す。

図7 スギ(現生材・出土材)乾燥時の変化

### 3) 現生材の乾燥過程での AE 発生

スギの現生材の乾燥は、約 15 時間で終了した。この間に含水率は約 250% から 10% にまで下がり、相対木口面積は、94% 程度にまで低下 (収縮) した。この乾燥条件は、乾燥中の材の変化と AE 発生との関連を明らかにするために設定したもので、実際にはこのような厳しい乾燥条件では乾燥しない。しかしこの条件でも乾燥終了までに割れや亀裂などの巨視的な破壊は発生しなかった。

乾燥開始からの 3 時間は乾燥速度は一定で (恒率乾燥期)、この間に含水率は 250% から 100% 程度にまで低下している。この期間は自由水が、細胞内を移動しながら乾燥が進み、試料の木口面の収縮や割れも殆ど見られない。表面張力の大きな水分が細胞内腔のような小さな間隙から蒸発によって抜け出る際には、細胞内腔で気泡が発生し (水切れ)、それとともに細胞内腔が瞬間的に減圧し、あるところで瞬間的に水柱が再度つながるといった現象が断続的に起きる。このような現象をキャビテーションと呼んでいるが、この時の圧力変動によって AE 波が発生すると考えられている。乾燥開始直後は、細胞内に十分な水分があるため、キャビテーションによる AE はあまり発生しないか、が発生しても減衰して検出しにくいと考えられる。これらに対応してこの期間は AE は殆ど検出されない。

乾燥開始後 3~10 時間の期間は含水率が徐々に減少する期間 (減率乾燥期) で、この間に含水率は 100% から 30 ないし 50% にまで低下する。この期間に材の収縮率はそれに徐々に増大し、AE 事象の発生数も大きく増加する。この期間では、試料内部からの自由水の拡散移動や、外周部において壁からの水分の脱着が起き始め、それに伴い試料の収縮率が増大したと考えられる。前述のキャビテーションによる AE の発生率も上昇すると思われる。

ウェーブガイドによって、この AE や収縮する材とウェーブガイドとの摩擦による AE が検出されているものと思われる。とはいうものの、含水率が繊維飽和点以上の材については、その中を伝搬する AE 波の減衰が大きいので、ウェーブガイドから離れた位置で発生した AE は検出されていないと考えられる。

乾燥開始後 11 から 15 時間の乾燥終期では、含水率の減少は緩やかになるが、試料の収縮はこの期間に最大となる。この間 AE 発生は急激に増加するが、その後乾燥終了に向けて徐々に停止に向かう。検出される AE 波の振幅がこの期間に最大になるが、これは乾燥終盤でより大きなレベルの破壊が材内で発生し、かつ含水率の低下とともに材内での AE 波の減衰が弱まることによるといえる。さらに乾燥終盤では、材の収縮によるウェーブガイドとの摩擦がより激しくなることも考えられる。

### 4) 出土材乾燥時の AE 検出

スギの出土材では、乾燥、AE 発生共に約 15 時間で終了し、含水率は約 750% から 11% にまで下がった。AE 発生終了時の相対木口面積は、48% にまで低下した (図 8)。出土材の場合は構造が非常に脆弱になっているために、乾燥プロセス全体を通じて発生する AE の数は、現生材の場合に比べて相当少ない。またキャビテーションのようなことが起こった場合、健全材ならば細胞壁が力に耐え、細胞内で圧力に負けて気泡が発生するが、出土材では壁が圧力に耐えられず、細胞が潰れてしまう可能性がある。

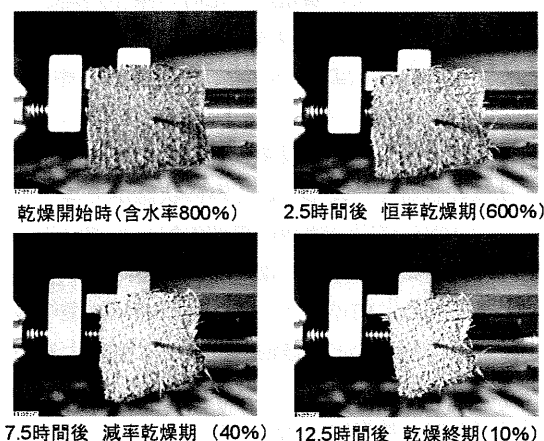


図8 スギ出土材の乾燥時の収縮の様子

乾燥開始直後の 4 時間は、恒率乾燥期を示し、この間に含水率は 750 から 350 ないし 450% にまで低下した。現生材とは異なり出土材の場合、乾燥開始後直ちに収縮が始まり、AE も徐々に増加した。収縮は表面のみではなく、より中心に近い部分も初期から収縮し始めたことから、試料の収縮とウェーブガイドの摩擦による AE

と、収縮に伴う材の破壊による AE が発生したと考えられる。この期間、材の収縮や破壊による AE は発生し難いと考えられるが、含水率が高いために僅かな AE でも伝搬し易いのではないかとと思われる。また同様に、材表面での水分移動に伴う圧力変動の影響も考えられる。乾燥開始後 4~10 時間の減率乾燥期では、含水率は 350 ないし 450 から 30-50%まで低下した。乾燥開始後 4~5 時間は、試料の収縮率が増加し、この間に最大値となる。この収縮・変形は、細胞からの脱水時に生じるのではなく、細胞内腔などのマクロな空隙からの水の蒸発によって生じている。出土木材は健全材より脆いために、表面張力の高い水が微小な壁孔を介して蒸発する際に発生する引張り力に耐えることができず、減圧状態となり、繊維飽和点より遥かに高い含水率で収縮・変形を生じ始めたと考えられる。この間に AE 発生は出土材に特異的な変化を示す。それは材料の収縮に対応して、この間に AE 発生も増加するが、その変化に変曲点が見られることである。7 から 8 時間目に相対木口面積曲線と AE 事象総数曲線に現れた肩部がこれに相当する。この肩付近での含水率は 200~300%で、表面からの乾燥が急激に進み、材の内外での含水率差が大きくなり、大きなひずみ分布とそれに伴う AE が発生するものと思われる。出土材での AE 発生の基本的なメカニズムは現生材と同じと考えられるが、出土木材の場合は構造が脆弱になっているために、この含水率域では健全材のように試料の破壊による AE はあまり発生していないのではないかと考えられる。更にこの含水率はちょうどスギ健全材の乾燥開始直後の含水率(飽和含水率)と同程度であり、AE が伝搬し難い含水率域であるということも考えられる。

乾燥終盤の 10 から 15 時間で、含水率は 30%以下にまで低下し、最終的には含水率と相対木口面積は共にほぼ一定になった。AE 発生は急激に増加した後徐々に発生が停止に向かう。この期間で平均 AE 振幅が最大になる。これらの現象は、この期間では材が乾燥してウェーブガイドから離れた場所で発生する小振幅の AE でも減衰せずに検出された可能性があることや、また材の収縮が殆ど停止していることから、材内のミクロからマクロの破壊が AE 発生の原因となると考えられることに対応している。出土材では、試料の乾燥後も暫く AE が発生し続けるものが見られた。これらの傾向や、現生材と出土木材の違いには再現性があり、AE 発生の特徴は材の収縮や含水率状態を示すパラメータとなりうると考えられる。

#### 5) PEG 処理における AE モニタリングの方法

ここでは PEG 処理中の出土木材から発生する AE による PEG 処理のプロセス監視の可能性を実験的に検討する。木簡を想定して、厚さの異なるクリの出土木材(幅

(板目方向 20mm、長さ(繊維方向) 50mm、厚さ(放射方向) 10 または 20mm、飽和含水率 630%、(独)奈良文化財研究所提供)を、PEG#4000(平均分子量約 3300)の水溶液を用いて 60℃で含浸し、その時の AE を計測した。試料は小型のガラス瓶に入れた PEG 水溶液に漬け、これを 60℃の温浴槽につけて含浸処理した。AE センサの取り付けかたは二通りとし、一方は、センサを試片の入った容器の外周面に直接取り付け、ゴムバンドで固定した。もう一方はセンサを試片を挟んだ保持具の上端部に、ゴムで取り付けた(図 9)。保持具は 2 枚のステンレス板とばねでできており、ウェーブガイドとしての役割を果たす。いずれも AE センサは音響カップリング剤としてシリコングリスを介して容器や保持具に接触させた。AE センサとして、共振周波数 150 kHz の PZT センサを用いた。センサからの信号は、プリアンプで 40dB 増幅、50 kHz のハイパスフィルタで波後、メインアンプで 30dB 増幅し(総合利得 70dB)、信号振幅がしきい値 300mV を超えたものを AE 事象として計測した。また AE 計測に際しては、温浴槽のスイッチの ON/OFF ノイズの影響を排除するなどの工夫をした。

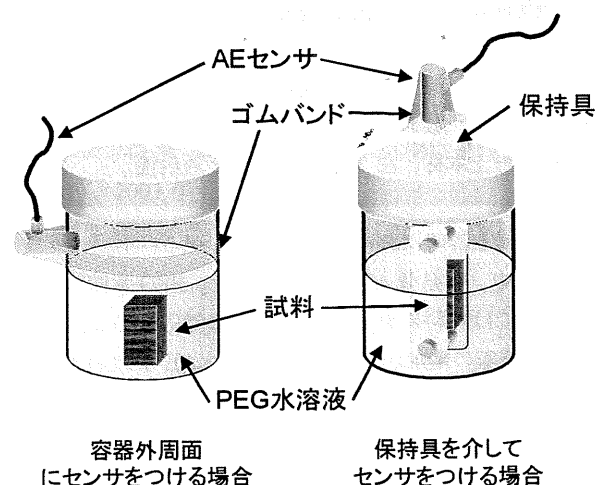


図 9 PEG 処理における AE センサ計測

含浸処理に際しては、40%PEG 水溶液の入ったガラス容器に、試片を 1 個ずつ入れて含浸させ、試片の重量、寸法を一定期間(2、3 日)毎に測定し、重量増加がほぼ横這いになった時点(PEG 含浸開始後 18 日目)で PEG 水溶液の濃度を 80%に上げた。PEG 含浸中の試料は、重量・寸法を測定する際にスキャナで画像を取り込み、濃度上昇前後での試料寸法や変形を比較した。

#### 6) PEG 濃度上昇時の試料重量や形状の変化

図 10 に、PEG 含浸処理中の試料の例を示す。PEG 含浸開始直後、接線方向長さは一旦減少した後増加に転じる場合があった。これは使用した PEG の分子量が 3300 と



大きいために流動性が低いいため、PEG が材中に拡散・浸透するよりも、材内部からの水の滲出の方が優先し、試料が収縮したためと考えられる。またこの時には一旦試料重量が明らかに減少する場合がある。PEG 水溶液の濃度上昇後に、試料寸法は、一旦減少するがその後増加する。試料重量もこの時一旦減少するが、その後増加に転じた。この一時的な寸法や重量の減少は、試料周囲の薬液の濃度上昇によって、拡散により一時的材内から水分が排出したためと考えられる。保持具に挟んだ試料は、ステンレス板で幅広の面(板目面)を挟まれた状態で PEG 処理が施され(図 10)、半径方向への変形はある程度抑制されている。また薬液との接触面積も少ないので、重量変化も保持具がない場合に比べて少なくなる。

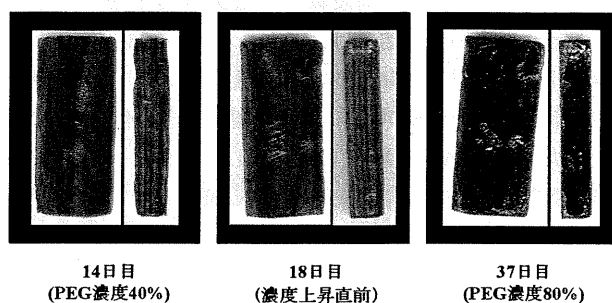


図 10 PEG 処理中の各段階における試料の状態  
接線方向 20mm、放射方向 10mm、繊維方向 50mm のクリ出土木材、左：接線面、右：放射面

#### 7) PEG 濃度上昇時における AE 発生

PEG 含浸中、突発型 AE が検出された。PEG 水溶液の濃度上昇後には試料の重量や寸法変化に対応するようにして AE 事象率の増加が見られた(図 11)。AE 事象の絶対数は多くはないが、これらは含浸による材料内での圧力変動や変形に由来するものと思われる。AE 事象率については、AE センサを容器外周面に取り付けたものの方が、保持具に取り付けたものよりも、PEG 濃度上昇後の増加が顕著であった。この原因として、保持具にはウェーブガイドとしてだけでなく試片を挟み固定する役割があるために、結果として変形が抑制された可能性があるということ、PEG の材中への拡散と水の材外への滲出が、AE センサを容器外周面に取り付けたものよりも少なかったことが考えられる。

実際に AE モニタリングによる出土木材の含浸処理を監視し、変形や収縮などの異常を予知し、処理を最適化する技術を確立するには、まだ基礎的研究の積み上げが必要であるが、上述の知見からその可能性は確認できたといえる。

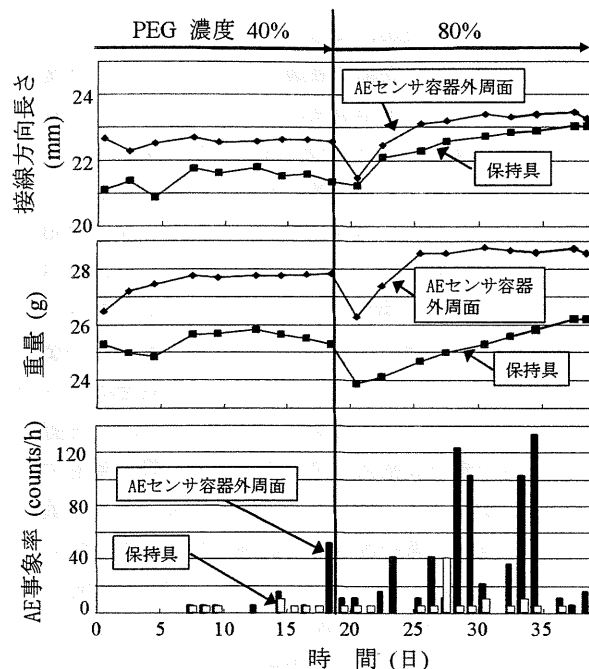


図 11 PEG 濃度上昇前後の AE 事象率の変化  
接線方向 20mm、放射方向 20mm、繊維方向 50mm のクリ出土木材

#### 参考文献

1. 奥村正悟・清龍登志子・野口昌巳：木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察, 京大演報 59, 283-291 (1987)
2. 奥村正悟・丑丸靖史・野口昌巳：木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察(続), 京大演報 61, 319-328 (1989)
3. 奥村正悟・廣瀬浩一・野口昌巳：木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察(その 3), 京大演報 64, 209-216 (1992)
4. 黒岩真弓・奥村正悟・藤井義久：木材の乾燥過程で発生する AE についての二三の考察(その 4), 京大演報 68, 151-160 (1996)
5. Kosei Ando and Masamitsu Ohta : Relationships between the Morphology of Micro-Fractures of Wood and the Acoustic Emission Characteristics, Mokuzai Gakkaishi, vol.41, No.7, 640-646 (1995)
6. Akiyoshi Mishiro : Ultrasonic Velocity in Wood and Its Moisture Content I. -Effect of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood-, Mokuzai Gakkaishi, Vol.41, No.12, 1086-1092 (1995)
7. Akiyoshi Mishiro : Ultrasonic Velocity and Moisture Content in Wood II. -Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (1) ; Moisture content below the fiber saturation point-, Mokuzai Gakkaishi, Vol.42, No.6, 612-617 (1996)

8. Akiyoshi Mishiro : Ultrasonic Velocity and Moisture Content in Wood III. - Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (2) ; During desorption from a water-saturated condition -, Mokuzai Gakkaishi, Vol.42, No.10, 930-936 (1996)
9. 「アコースティック・エミッションの特性と理論－構造物の稼動時の非破壊検査法－」丹羽義次・大津政康 森北出版 (1988)
10. 「アコースティックエミッションの理論と実際－非破壊検査におけるフラクタル評価法－」仲佐博裕 地人書館 (1994)
11. 埋蔵文化財ニュース 93, 奈良国立文化財研究所埋蔵文化財センター (2000)
12. 酒井温子 : 出土木材の劣化過程, 木材学会誌 Vol.37, No.4, 363-369 (1991)
13. 河越幹男・百村敬一・石垣昭 : 遺跡出土木材の乾燥と変形, 木材学会誌 Vol.26, 1-14 (1992)
14. Yosei Kohdzuma, Kazuya Minato and Yukio Katayama : Relationships between Some Properties of Waterlogged Woods, Mokuzai Gakkaishi, Vol.42, No.7, 681-687 (1996)
15. 福山萬治郎・浦上弘幸 : 飽水木材中における非電解質の拡散(第1報)－高感度示差屈折計による拡散速度の測定－, 木材学会誌 Vol.26, No. 9, 587-594 (1980)
16. 福山萬治郎・浦上弘幸 : 飽水木材中における非電解質の拡散(第2報)－一価アルコールの拡散速度－, 木材学会誌 Vol.28, No. 1, 17-24 (1982)
17. 福山萬治郎・浦上弘幸 : 飽水木材中における非電解質の拡散(第3報)－ポリエチレングリコールの拡散速度－, 木材学会誌 Vol.32, No. 3, 147-154 (1986)
18. 姜愛慶・今村祐嗣・朴相珍 : 水浸出土木材の寸法安定に関する研究－PEG・糖・アルコールによる寸法安定化の違いについて－, 日本文化財科学会誌 第33号, 39-56 (1996)
19. 姜愛慶・酒井温子・今津節生・今村祐嗣・朴相珍 : 水浸出土木材へのポリエチレングリコールとスクロースの拡散, 木材学会誌 Vol.43, No. 6, 504-512 (1997)
20. 姜愛慶・酒井温子・今津節生・今村祐嗣・朴相珍 : 水浸出土木材へのポリエチレングリコールとスクロースの拡散, 木材学会誌 Vol.43, No. 6, 504-512 (1997)
21. Y. Fujii, T. Kuroda, Y. Kohdzuma, Y. Yanase, S. Okumura, and Y. Imamura: Detection of acoustic emission (AE) from water logged wood in PEG treatment. International Congress on the Conservation and Restoration for Archaeological Objects, Nara, 14-16 Feb. (2002)
22. 黒田朋未 : 出土木材の保存処理への AE 法の適用－乾燥及び PEG 処理における AE 発生－ 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻修士論文 (未発表)、2003年1月31日